

M 27 : Systèmes bouclés



proposée par :

CHARLOTTE MESMACQUE & GRÉGORY GREDAT

corrigée par :

JEAN-BAPTISTE DESMOULINS

Le 19 Décembre 2013

Table des matières

Introduction	2
I Asservissement en vitesse d'une machine à courant continu	2
I.1 Perturbations en boucle ouverte	3
I.2 Caractérisation de la boucle ouverte	3
I.3 Détermination du correcteur	4
I.4 Apports de la boucle fermée	5
II Asservissement du flux lumineux émis par une LED	6
II.1 Présentation du système	6
II.2 Système oscillant et mise en œuvre de la méthode de Ziegler Nichols	7
II.3 Étude du système asservi	8

Pour préparer l'ensemble du montage, nous recommandons de lire et relire les polycopiés de cours de M. DESMOULINS, où tout est écrit et détaillé sans nul besoin de piocher ailleurs. Ce compte-rendu rapporte uniquement l'exposé présenté lors du montage où le plus gros du travail reste de tourner les (bons) boutons et brancher les (bons) câbles (ce qui demande de l'entraînement pour finir dans le temps imparti). Une alternative au montage proposé consisterait à étudier la boucle à verrouillage de phase en se focalisant sur les éléments constitutifs (il ne s'agit pas de faire de la modulation et démodulation de fréquence). «*Pourquoi faire simple quand on peut faire compliqué ?*» (2^e principe Shadok). En physique, il faut aussi savoir que l'asservissement en température joue un rôle très important ! Cependant, l'étude de tels systèmes (dont la réponse est très lente) ne convient pas à un oral d'agreg où le temps est précieux.

Introduction

Un système bouclé est un système comprenant au moins une rétroaction destinée à ce que le signal d'entrée ait une action tempérée par le signal de sortie. L'exemple, probablement le plus commun, est celui du thermostat d'un four.

La rétroaction est un concept dont les origines se perdent dans l'histoire. Citons par exemple, dans le contexte de l'industrialisation au 19^{ème} siècle, le servomoteur de Joseph FARCOT, utilisé pour les machines à vapeur.

Aujourd'hui, l'automatique est une discipline dédiée entièrement à l'étude des systèmes bouclés mais de nombreux domaines sont concernés par de tels systèmes. Citons la biologie, pour les processus hormonaux notamment, ou encore la finance, l'économie.

En physique, nous distinguerons deux types de systèmes bouclés :

- (i) *les systèmes asservis dont l'objectif est de permettre au système de réagir au mieux, sans action extérieure et de façon reproductible*
- (ii) *les oscillateurs pour lesquelles la boucle est réalisée dans le but de maintenir le système dans un état instable.*

I Asservissement en vitesse d'une machine à courant continu

Le montage constituant la boucle ouverte est présenté dans le polycopié de cours ainsi que sur le document numérisé qui compose le tableau élaboré pour la présentation (on s'y réfèrera à chaque fois).

Pour motiver l'asservissement en vitesse d'une machine à courant continu, on peut prendre un exemple de la vie courante : lorsque l'on utilise un appareil du type machine à laver, il est utile que la vitesse de rotation du tambour ne dépende pas des variations de la source de tension alimentant cette machine ni de la quantité de linge introduite à l'intérieur de celle-ci. De plus, bien souvent, il suffit de brancher un deuxième appareil sur le secteur pour que la tension d'alimentation chute. De façon analogue, il serait malheureux que la vitesse de défilement d'un tapis roulant dépende du nombre de personnes s'y trouvant. On va donc chercher à asservir le système pour se débarrasser de l'effet de ces perturbations : l'alimentation stabilisée et la résistance de charge R_{ch} (un rhéostat) dans notre cas.

La commande en tension V_{com} du hacheur convertissant la tension d'alimentation E en tension continue variable constitue l'entrée de la boucle ouverte. L'image de la vitesse de rotation de l'arbre par la dynamo-tachymétrique V_{Ω} en constitue la sortie. Nous avons $k = 6 V / (1000 \text{ tr/min})$ et $K = 65 V / (3000 \text{ tr/min})$ comme facteurs de conversion électromécanique pour la dynamo-tachymétrique

et la machine à courant continu, respectivement. (C'est écrit dessus!). Nous allons voir en premier lieu l'effet des perturbations sur la vitesse de rotation de l'arbre.

I.1 Perturbations en boucle ouverte

On commence par fixer $V_{\text{com}} = 5 \text{ V}$ et on relève la courbe $V_{\Omega} = f(E)$ en l'absence de résistance de charge. Pour la mesure de ces tensions continues, il est très utile et plus rapide d'utiliser un simple Voltmètre plutôt que l'oscilloscope! Pour les incertitudes, on regarde la notice du voltmètre (pas forcément essentiel à l'échelle des 4h de préparation, nous ne l'avons pas fait). On observe, au delà d'un seuil certainement dû à la chute de tension dans les interrupteurs du hacheur — fait pour travailler à 200 V — une dépendance quasi-linéaire. On relève de même la courbe $V_{\Omega} = f(R_{\text{ch}})$ pour exhiber une forte dépendance en la charge.

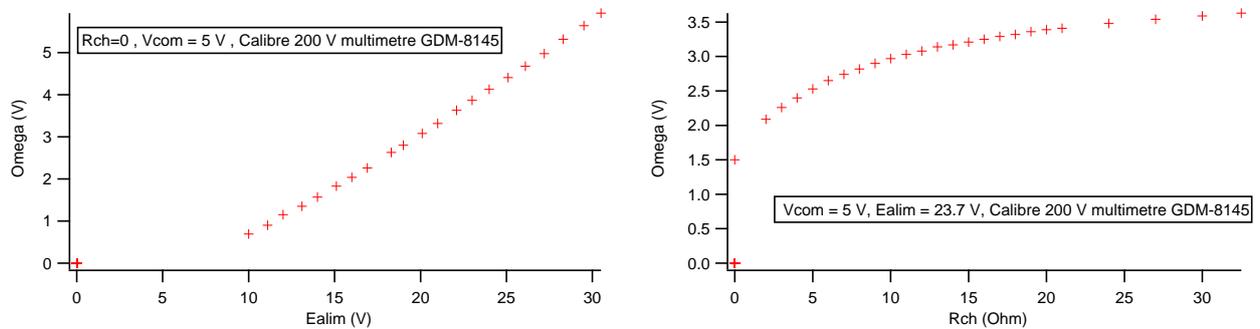


Fig. 1 – Effets d'une perturbation sur la vitesse de la machine à courant continu

Remarques du correcteur :

✧ Le tracé de ces courbes n'est pas essentiel, il ne s'agit pas d'un montage de métrologie. On peut montrer l'effet des perturbations de manière qualitative.

✧ Comment interprète-t-on l'effet d'une variation de R_{ch} ? En augmentant R_{ch} , on diminue le couple de charge : le courant appelé diminue ce qui induit une augmentation de la vitesse de rotation.

✧ Il peut être plus intéressant de tracer $V_{\Omega} = f(\text{Puissance appelée})$.

I.2 Caractérisation de la boucle ouverte

Grâce aux équations électrique et mécanique, on peut décrire la boucle ouverte par un comportement de type second ordre. La fonction de transfert tension vitesse fait apparaître une constante de temps électrique τ_e et une constante de temps électromécanique τ_{em} . Comme, typiquement, $\tau_e \ll \tau_{em}$ la fréquence de coupure électromécanique est bien plus petite que la fréquence de coupure électrique. Ainsi, nous estimerons que sur la plage de sollicitation d'entrée le système pourra être approximé par un passe-bas du premier ordre que nous chercherons à identifier.

La zone de commande du hacheur est $[0 \text{ V}, 10 \text{ V}]$. On travaille d'abord à $R_{\text{ch}} = 0$ et on fixe la tension d'alimentation à $E = 24 \text{ V}$. À l'aide d'un GBF, on applique un signal V_{com} en créneau

avec un offset de $5V$ et une amplitude peak to peak de $1V$ à 1 Hz . En utilisant le mode high-resolution de l'oscilloscope (car le signal est bruité et basse fréquence), on observe la commande et la dynamo-tachymétrique. L'hypothèse du passe-bas du premier ordre est justifiée : pas de retard, tangente à l'origine non nulle, pas d'oscillation. On relève alors le gain statique de la boucle ouverte en effectuant le rapport des amplitudes des deux signaux $K_{BO} = \frac{\Delta V_{\Omega}}{\Delta V_{\text{com}}}$ (au curseur, c'est plus prudent qu'une mesure automatique de ratio) ainsi que τ le temps de montée à 63% . On obtient typiquement $\tau \sim 100\text{ ms}$.

La boucle ouverte ainsi caractérisée, il reste à dimensionner le correcteur à mettre à l'œuvre.

Remarques du correcteur :

✧ Pourquoi prendre $1V$ d'amplitude et pas $4V$? On impose une dynamique faible pour éviter les non-linéarités. On ne doit pas non plus prendre trop peu pour avoir un rapport signal à bruit correct.

✧ Lorsque l'on détermine τ et K_{BO} , bien que seul un ordre de grandeur importe, il faut faire ça proprement ! C'est l'occasion de montrer au jury ses compétences sur la maîtrise de l'oscilloscope. Il suffit de faire un run-stop pour perdre toute crédibilité... Il faut donc bien synchroniser les signaux. Pour cela, on déclenche sur le créneau non bruité et on travaille en mode NORMAL. Cependant, le signal est à 1 Hz , le déclenchement peut prendre un certain temps : il faut s'assurer que le signal croise bien le niveau de déclenchement avant d'attendre. En mode Auto, au bout d'un temps donné, le processus de déclenchement survient et on observe une trace qui dérive lorsque le signal est lentement variable. (Ce dernier mode sert surtout pour observer des signaux continus).

✧ Pour la mesure de τ , il faut s'assurer que la réponse ait eu le temps d'atteindre son régime permanent : prendre une fréquence très basse $< 1\text{ Hz}$.

I.3 Détermination du correcteur

On présente le correcteur proportionnel intégral, dont la fonction de transfert s'écrit :

$$\begin{cases} C(p) = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_c p} \right) & , \text{ avec} \\ \tau_c = R_4 C \quad \text{et} \quad K_c = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} . \end{cases}$$

On choisira $R_3 = R_4$ (de l'ordre de $100\text{ k}\Omega$) pour contrôler séparément le gain grâce au premier AO et la constante τ_c grâce au second AO.

(i) On impose d'abord $\tau_c = \tau$, ainsi la fonction de transfert en boucle fermée se réduit à :

$$\text{FTBF}(p) = \frac{1}{1 + \tau_{\text{BF}} p} \quad \text{où} \quad \tau_{\text{BF}} = \frac{\tau}{K_{BO} K_c} .$$

C'est un premier ordre qui augure de bonnes propriétés en terme de stabilité, d'erreur statique nulle ($\text{FTBF}(p=0) = 1$) et de rapidité ($\tau_{\text{BF}} \leq \tau$ si $K_{BO} K_c \geq 1$). Ceci permet de choisir la valeur C .

(ii) On prend, plutôt arbitrairement, $K_{BO} K_c = 1$. On sent que cette proposition est acceptable du point de vue du compromis rapidité / stabilité que l'on illustrera dans le § suivant. Ainsi, on détermine une valeur du rapport R_2/R_1 et le dimensionnement du correcteur est achevé.

Remarques du correcteur :

✧ Pourquoi est-il bien de prendre $\tau_c = \tau$? Je pense que les arguments déjà avancés sont satisfaisants.

✧ Pourquoi est-il bien de prendre $K_{BO} K_c = 1$? En fait, je vois ce choix comme un point de départ : la valeur de τ_{BF} montre qu'en imposant cette condition, ce ne sera pas pire. En fait, on cherche à avoir une bonne dynamique : si on augmente K_c alors des non linéarités sont susceptibles d'apparaître. Avec la condition précédente, on part d'un point qui de bonnes chances de mener à une réponse correcte.

I.4 Apports de la boucle fermée

En l'absence de résistance de charge et à $E = 24 V$, on impose une tension d'entrée continue que l'on augmente jusqu'au décrochage pour déterminer la plage d'asservissement. Pour la visualisation, on met l'oscilloscope en mode Roll. On constate également une erreur statique nulle. Il est alors très bien de comparer la valeur de la vitesse de rotation pour laquelle il y a décrochage à ce que l'on prédit par le calcul. En effet, en notant α le rapport cyclique du hacheur, on a, dans la plage de linéarité du hacheur : $\alpha = V_{com}/10$. La vitesse de rotation de l'arbre vaut $\Omega = \alpha E/K$. Donc, son image en tension par la dynamo-tachymétrie s'écrit :

$$V_\Omega = \frac{V_{com}}{10} \frac{k E}{K}.$$

Lorsque V_{com} atteint $10 V$, il y a saturation. Par conséquent, la plage d'asservissement prédite est :

$$0 \leq V_\Omega \leq \frac{k E}{K} \simeq 6.65 V.$$

On illustre ensuite le compromis rapidité / stabilité en repassant au signal créneau. En augmentant K_c (grâce au potentiomètre R_2), on observe une réponse de plus en plus rapide, mais la stabilité se dégrade. Dès que la descente de la réponse au créneau n'a plus la même allure que la montée, on peut statuer sur l'apparition de non-linéarités.

Enfin, il reste à montrer que le bouclage effectué a permis de tuer les effets des perturbations. (Pour cela, il faut s'assurer de rester dans la plage d'asservissement.) On remet l'oscilloscope en mode Roll, on envoie en commande un signal continu (disons $5 V$) et, d'abord sans résistance de charge, on observe qu'en faisant une variation de la tension d'alimentation (disons de $24 V$ à $20 V$, le signal s'écarte puis reconverge vers la consigne. De même, en branchant et débranchant soudainement la résistance de charge, on observe que l'on s'est bien débarrassé des effets mis en évidence dans le § I.1.

Remarques du correcteur :

✧ La comparaison de la plage d'asservissement mesurée (la première chose à faire) à la plage d'asservissement prédite lui donne de la substance.

✧ Dans un système très rapide, l'effet d'une perturbation est quasi-invisible : diminuer le gain si besoin pour le rendre visible (d'amplitude appréciable).

✧ La fonction de transfert en réponse à une perturbation n'est pas celle de la réponse à un ordre. La forme du signal d'entrée importe.

II Asservissement du flux lumineux émis par une LED

L'intérêt de cette étude est double, non seulement nous verrons qu'il est intéressant de mettre en œuvre une méthode différente lorsque le système étudié est d'ordre élevé, qu'aucun modèle de connaissance n'est facile à établir mais aussi nous illustrerons l'aspect "oscillateur" que le jury pourrait nous reprocher d'avoir mis sous le tapis. Il ne s'agit pas de détailler autant l'action du correcteur et autres idées importantes développées en première partie mais de montrer ce qui est nouveau. Une application de cet asservissement consiste à contrôler l'éclairage ambiant dans une pièce, ou encore le flux émis par une diode laser susceptible d'être perturbée par des effets de température ou autre.

II.1 Présentation du système

La maquette proposée ne doit pas rester une boîte noire, il faut faire l'effort de la décrire un minimum. La partie gauche sert à l'émission lumineuse. La LED se pilotant en courant, il faut tout d'abord effectuer une conversion tension / courant. Une tension V_1 , continue (c'est un petit potentiomètre) permet de polariser correctement la LED. La tension $V_{in} = \langle V_{in} \rangle + \widetilde{V}_{in}$ sert, quant à elle, à moduler le faisceau. Le polarisation de la LED se fait au moyen d'une tension de polarisation $V_{cc} = 12V$ (réglable) à travers une résistance $R_0 = 511\ \Omega$. Le transistor PNP permet d'éviter des oscillations intempestives. Le courant injecté dans la LED s'écrit ainsi :

$$i_{LED} = \frac{V_{cc} - (V_1 - \widetilde{V}_{in})}{R_0}.$$

Dans la partie récepteur, une photodiode est polarisée en inverse par une tension $-V_{pol}$: ceci crée une barrière de potentielle qui permet, à chaque photon incident, l'émission d'une paire électron / trou participant à la conduction. On peut ainsi, dans le bon domaine de sensibilité spectrale de la photodiode (utiliser la LED dans le rouge uniquement), obtenir une image linéaire du flux lumineux émis par la LED. En convertissant le courant ainsi créé par la photodiode en tension (et en inversant celle-ci), on obtient une image en tension V_S du flux lumineux de la LED capté par la photodiode. C'est cette dernière quantité qui sera asservie. La figure 2 présente la zone de linéarité où l'on doit moduler le flux émis par la LED. Cette courbe a été établie en préparation en fixant $V_{in} = 0$, en accolant émetteur et récepteur et en faisant varier le potentiomètre V_1 . Lors de la présentation, pour gagner du temps, on a juste envoyé V_{in} à l'oscilloscope (avec une sonde d'oscilloscope) ainsi que V_S et tracé la courbe en mode XY (en trace persistante et en inversant V_1 pour avoir directement l'image de i_{LED} .)

En dernier lieu, on montre la grande erreur statique en envoyant un signal créneau en entrée (avec offset) comme à la partie précédente.

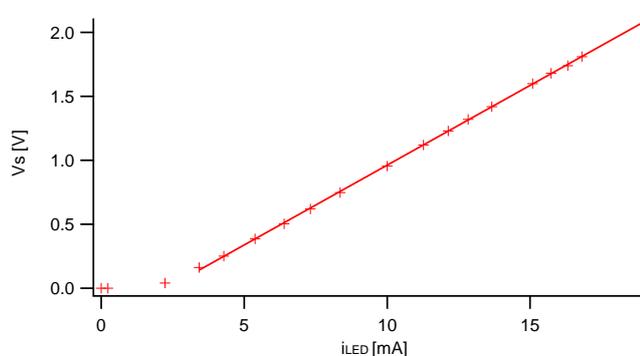


Fig. 2 – Image de la puissance optique délivrée par la LED VS le courant injecté dans celle-ci.

Remarques du correcteur :

✧ Comment fonctionne le premier convertisseur tension / courant ? Qu'a-t-on en sortie du premier AO ? On a $V_1 - \widetilde{V}_{in}$. L'AO, en sortie duquel est disposé le transistor PNP réalise la transductance...

✧ Quand on n'y connaît rien en électronique, il est préférable de faire apparaître les différentes fonctions du circuit par des blocs. On s'expose à moins de questions de la part de jury, qui démasquera rapidement votre fébrilité sur le sujet... (Ceci ne concerne peut être que moi mais ça demeure un bon conseil).

II.2 Système oscillant et mise en œuvre de la méthode de Ziegler Nichols

À cause des différentes fréquences de coupure des composants actifs (notamment) constituant le système, on a affaire à un système d'ordre élevé ! On met alors V_S à l'entrée "-" d'un comparateur et l'entrée "+" à la masse. Ainsi, en augmentant le gain du correcteur proportionnel, on met en évidence des oscillations. On a volontairement rendu le système instable et fabriqué un oscillateur ! Il est bon alors de faire passer deux messages : l'augmentation du gain permet de dégrader la stabilité et les non-linéarités des différents composants permettent l'obtention d'un régime permanent d'oscillation.

La méthode de ZIEGLER-NICHOLS est bien adaptée à des systèmes passe-bas potentiellement instables. Elle consiste, après avoir fabriqué un oscillateur, à déterminer le gain auquel apparaissent les oscillations K_{osc} (à l'aide du potentiomètre) et la période T_{osc} de ces dernières. Ensuite, on met en œuvre une correction proportionnelle intégrale (comme auparavant), de sorte que $K_c = 0.45 K_{osc}$ et $\tau_c = 0.83 T_{osc}$ (de l'ordre de 1 à 10 μs). Cette méthode est EMPIRIQUE. On peut, par exemple, dire qu'en prenant un gain plus faible à celui où apparaissent les oscillations, on s'éloigne bien des instabilités. Quant à la constante de temps, un diagramme de NYQUIST est bienvenu si la question est posée.

Remarques du correcteur :

✧ Qu'est ce qui nous permet de dire, en regardant le système, qu'il est d'ordre élevé ? Quels sont les ordres de grandeurs des différentes fréquences de coupure ? Les AO ont une fréquence de coupure de l'ordre du MHz ; le transistor, également de quelques MHz ; la LED (dont le temps de réponse est beaucoup plus long qu'une diode laser) de 10 à 100 MHz ; la photodiode de moins de 10 MHz (car derrière il y a un condensateur dans le circuit transconductance). En définitive, il n'y a pas de fréquence de coupure négligeable devant les autres : l'ordre est élevé. Il faut avoir les ordres de grandeur en tête pour justifier la démarche et anticiper une question du jury.

✧ Quel est le rôle du condensateur dans le circuit transconductance de la photodiode ? Il est là pour faire en sorte que la photodiode réponde moins vite, facilite l'observation des oscillations.

✧ De quoi K_{osc} dépend-il ? Si on veut K_{osc} plus grand, que faut-il faire ? En éloignant l'émetteur du récepteur, alors K_{osc} augmente car, la LED focalisant très mal, le gain optique diminue. K_{osc} dépend beaucoup de la position de l'émetteur et du récepteur ! C'est la raison pour laquelle nous les avons accolés et c'est ce qui fait la non reproductibilité de l'expérience.

II.3 Étude du système asservi

Là encore, on relève la plage d'asservissement, l'erreur statique nulle et le compromis stabilité / rapidité. Ceci n'apporte rien de nouveau à ce qui a déjà été montré, à part souligner le fait que le système a bel et bien été asservi. Il est plus intéressant, à mon avis, de se focaliser sur l'effet de perturbations. Pour cela, on envoie en entrée un signal continu dans la plage d'asservissement. Dans l'obscurité, en éloignant la LED de la photodiode (sur un banc optique, c'est mieux, pour qu'elles restent face à face) on observe que la LED éclaire de plus en plus pour que le flux intercepté par la photodiode reste identique. Il arrive un point où il y a décrochage : la LED sature, ne peut pas éclairer davantage. À distance fixée cette fois, en allumant l'éclairage ambiant à 100 Hz des néons, on observe que la LED éclaire moins car l'éclairage ambiant participe au flux reçu par la photodiode (dont l'image est asservie). Il faut pour cela que la consigne soit plus haute que ce que la photodiode reçoit de l'éclairage ambiant. Si la consigne est plus basse que ce que reçoit la photodiode par l'éclairage ambiant : la LED s'éteint et le système ne peut plus suivre.

Remarques du correcteur :

- ✧ Pour la plage d'asservissement, bien penser à adapter la base de temps et mettre la référence à 0 pour la voie d'ordre et la voie de sortie.
- ✧ Être clair sur l'effet des perturbations. Ce n'est pas évident, ne pas hésiter à se mettre d'abord dans le noir et essayer de montrer au jury (autant que possible), l'éclairement de la LED.



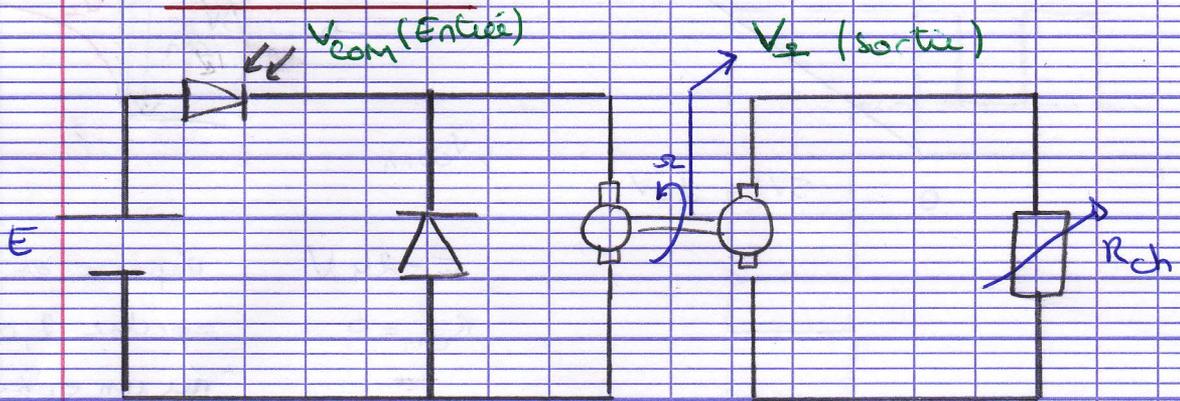
«Pour connaître par vous-mêmes, sans attendre l'avenir, la fortune de vos efforts, retrouvez résolument vos manches et faites votre destinée»

GEORGES CLEMENCEAU

(1)

M 2 7 : Systèmes bouclés

II. / Asser vissement en vitesse, de la machine à courant continu

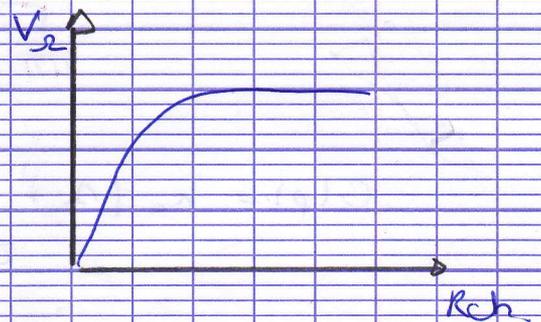
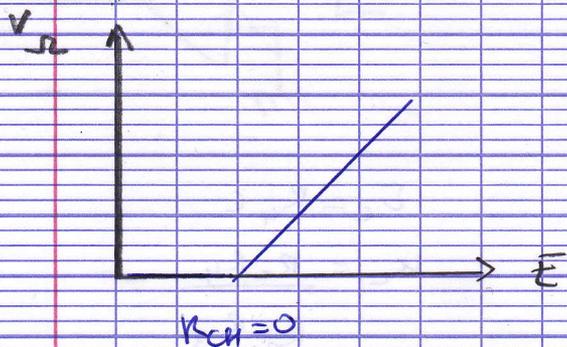


source convertisseur continu \rightarrow continu variable
 moteur facteur de conversion EM $K = \frac{65V}{3000 \text{ tr/min}}$
 génératrice charge

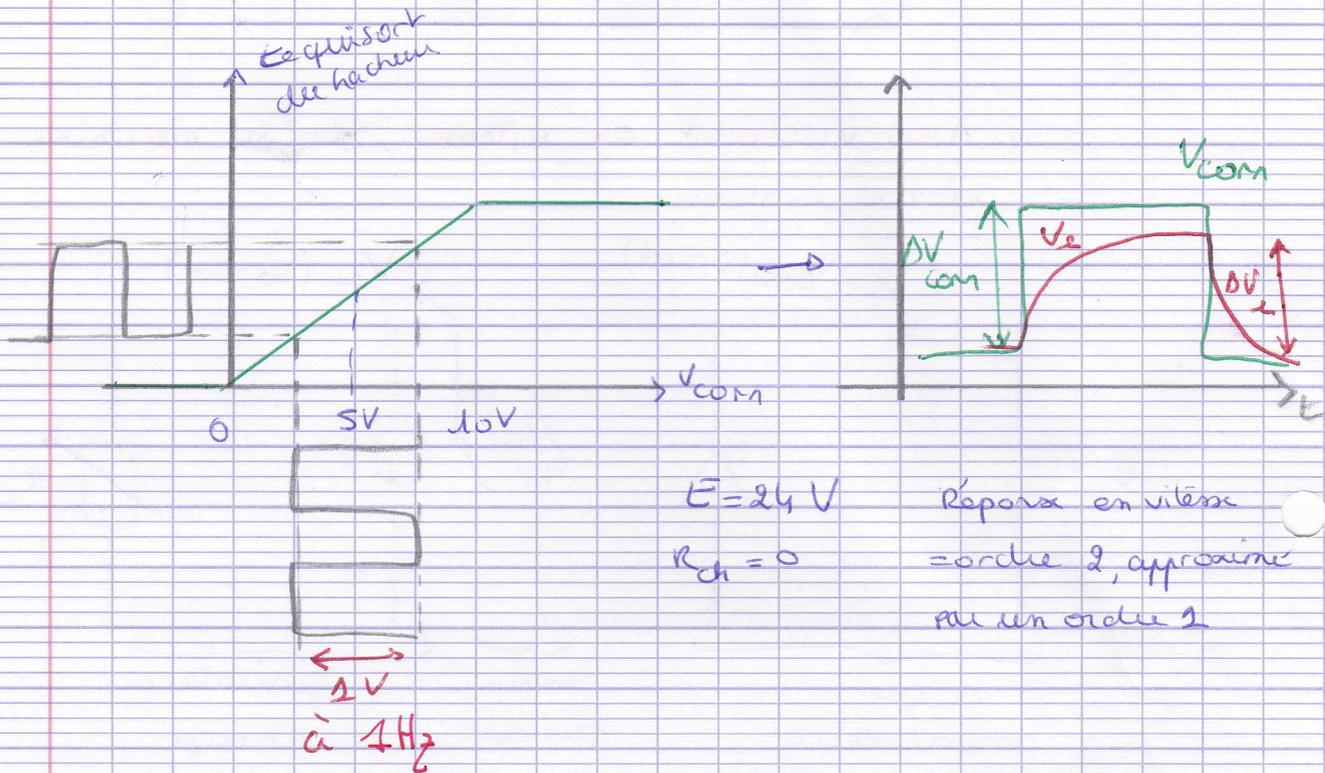
V_c donné par la dynamochymétrie de facteur de conversion EM $k = \frac{6V}{2000 \text{ tr/min}}$

1. Perturbations en boucle ouverte.

Effets de E et R_{ch} sur la vitesse à $V_{com} = 5V$



2. Caractérisation de la bande ouverte



$$\Delta V_{com} = 1V$$

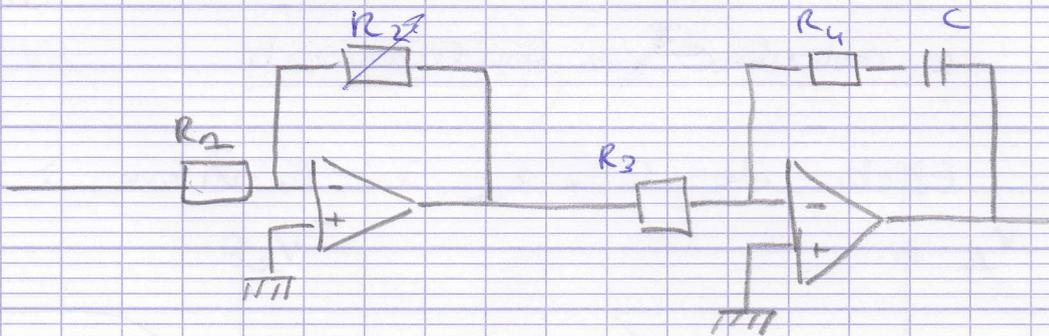
$$\Delta V_{v_c} = 760mV$$

$$\tau_{63\%} = 160ms$$

$$k_{BO} = 0,74$$

3) Choix des correcteurs

Proportionnel - Intégrale

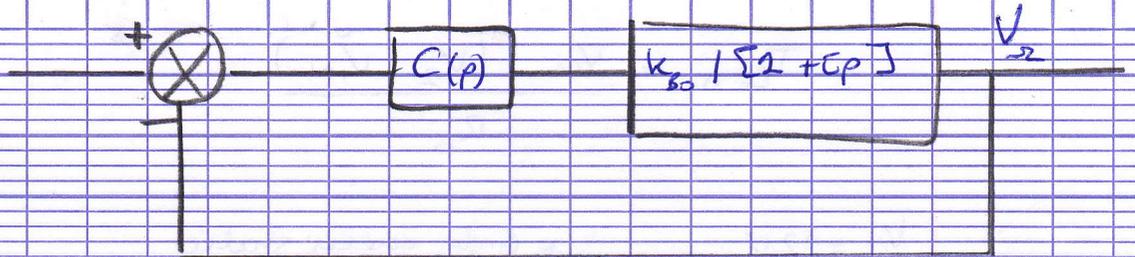


$$G(p) = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i p} \right)$$

$$\tau_i = R_4 C$$

$$k_c = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3}$$

2



si $G_c = C$, alors $FIBF = \frac{1}{1 + \epsilon_p}$ $G_{BPF} = \frac{C}{k_{B0} k_c}$

$\hookrightarrow C = 2 \mu F$
 $R_4 = R_3 = 160 k\Omega$

$k_{B0} k_c = 1$
 $\hookrightarrow R_1 = 1 k\Omega$
 $R_2 = 1,35 k\Omega$

4. Apport de la boucle fermée.

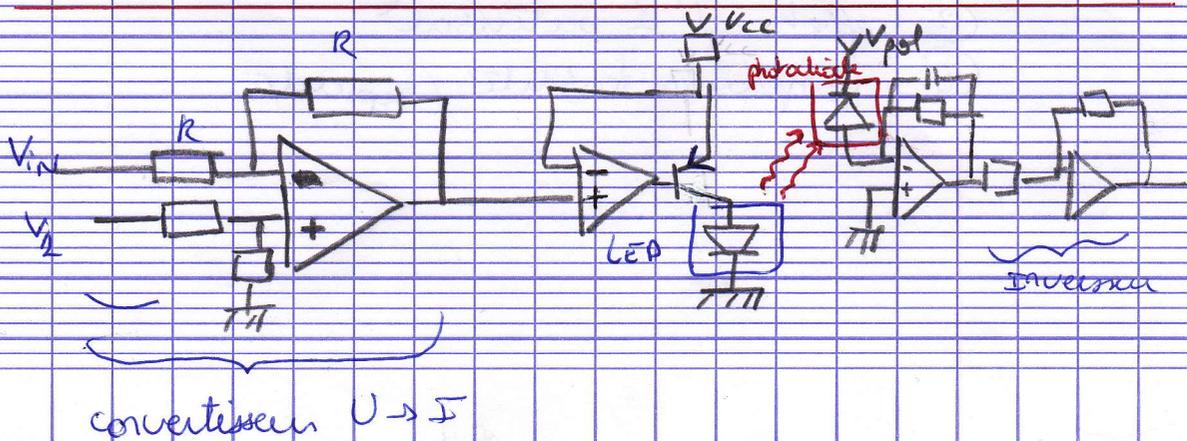
- ① plage d'asservissement
- ② Erreur statique nulle
- ③ compromis rapidité/stabilité
- ④ effets de saturation

on prédit pour la plage d'asservissement :

$$0 < V_e < \frac{kE}{k} = 6,65V$$

On mesure : $\frac{1}{0,7V}$

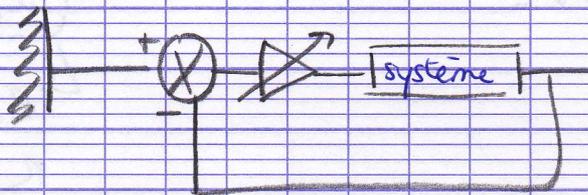
I.1 Asservissement du flux lumineux émis par une LED



$$I_{CEQ} = \frac{V_{CC} - (V_{CE} - \tilde{V}_{in})}{R_0}$$

$V_{CC} = 12V$ + Grande valeur statique
 $R_0 = 511 \Omega$

2. Σ oscillant a méthode de Ziegler-Nichols



$$k_{osc} = 0,600$$

$$t_{osc} = 8,2 \mu s$$

\Rightarrow correcteur PI

$$\bar{t}_c = 0,83 \quad T_{0\alpha} = 6,8 \mu s$$

$$k_c = 0,45 \quad k_{0\alpha} = 0,18$$

$$C = 3 \text{ mF} \quad \rightarrow R_4 = R_3 = 680 \Omega$$

$$R_1 = 100 \text{ k}\Omega \quad \rightarrow R_2 = 18 \text{ k}\Omega$$

3. Boucle fermé

- ① plage d'asservissement
- ② valeur statique nulle
- ③ effet d'1 perturbal
- ④ Compromis stabilité / rapidité