

Asservissement de grandeurs physiques : Exemple de la vitesse d'un moteur et du flux lumineux émis par une LED

• Problématique :

Lorsque l'on réalise un système bouclé, on peut être amené à s'intéresser à différents paramètres : la précision, la rapidité, la robustesse de la stabilité, etc...

Si on travaille avec un signal d'entrée constant (régulation), il sera souvent important d'avoir un système précis (élimination de l'erreur statique afin de suivre la valeur de consigne).

Si on travaille avec un signal d'entrée qui fluctue dans le temps (asservissement), on sera amené à s'intéresser à la dynamique du système et notamment à sa rapidité (attention alors à la stabilité...). Il faudra donc choisir des signaux test comme des créneaux ou des sinusoïdes...

• L'identification :

Avant de penser à boucler, il va falloir caractériser le système étudié. C'est l'étape d'identification. Plusieurs problèmes vont se poser.

- quels tests réaliser (forme des signaux, fréquence, amplitude, point de fonctionnement choisi...).
- quel modèle choisir une fois que l'on a obtenu une réponse. En effet, on peut utiliser les modèles plus ou moins rustiques : un premier ordre, un second ordre... Il existe également des méthodes empiriques adaptés à certaines applications particulières.
- le modèle est-il satisfaisant ? En effet, lors de l'identification, on peut se contenter d'un modèle rustique qui conduira à des performances réelles du système asservi différentes de ce que l'on attendait... Si l'écart est préjudiciable, on devra revenir sur le modèle pour en choisir un qui sera plus adapté...

• Le calcul du correcteur :

Une fois que l'on a obtenu un modèle supposé satisfaisant, on doit choisir un correcteur qui va réaliser les améliorations décidées...

rq : Dans le TP, on choisira une démarche différente puisque l'on testera plusieurs types de corrections pour vérifier ce qu'elles apportent comme améliorations...

• Pourquoi ça ne marche pas ?

Il arrivera que le système ne réponde pas aux signaux tests malgré des calculs corrects... Dans notre démarche, les systèmes étudiés sont parfaitement linéaires. Dans la pratique, ces derniers comportent bon nombre de non-linéarités (tension de commande en entrée du hacheur prise en compte uniquement dans la plage [0V ; 10V], sortie des correcteurs analogiques qui sature au-delà de la plage [-15V ; +15], ...). On devra donc penser à jeter un coup d'œil en sortie du correcteur pour voir si ce dernier délivre des signaux réellement pris en compte par le système...

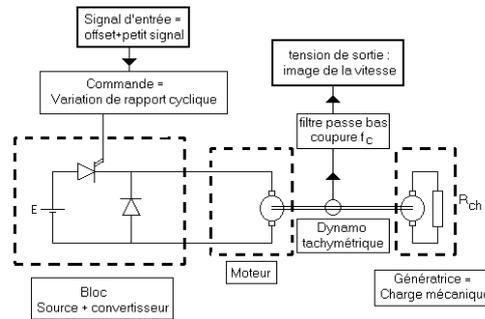
I. Asservissement de vitesse d'une machine à courant continu.

L'objectif de cette expérience est de commander une machine à courant continu en vitesse, en faisant en sorte que ce paramètre soit indépendant de l'état de la machine (alimentation électrique, ou charge mécanique...). Une fois le système corrigé, le gain statique (qui définit l'état en régime permanent) ne doit plus faire intervenir les paramètres du système (qui sont susceptibles de fluctuer).

I.1. Identification du système.

I.1.1. Présentation de la boucle ouverte et réglages préliminaires.

• On va alimenter un hacheur série non réversible en courant par une alimentation stabilisée de tension de sortie a priori fixée (elle peut par exemple représenter un pont redresseur à diode branché sur le réseau). L'alimentation stabilisée E sera réglée à 25V et devra pouvoir délivrer au moins 3A (à vérifier)



La seconde machine placée sur l'arbre de rotation et qui débite dans une résistance R_{ch} est destinée à appliquer un couple résistant sur la moteur. Ce couple sera d'autant plus important que le courant qui la traverse est grand. A une vitesse donnée, cela signifie que le couple résistant est d'autant plus important que la résistance R_{ch} est faible.

• Quelle type de modèle peut-on attendre ?

- Le hacheur peut être vu comme un gain statique (éventuellement avec un retard dont on peut légitimement négliger l'effet si la fréquence de hachage est de 10 kHz environ, ce qui est impératif dans cette expérience).
- Le moteur à courant continu peut être vu, vis à vis de sa réponse en vitesse, comme un filtre passe-bas d'ordre 2. On peut adopter un modèle de passe-bas d'ordre 1 si ce système est très amorti (constante de temps mécanique forte à cause de l'inertie...). En effet, dans ce cas, les fréquences de coupure sont séparées, et si les harmoniques du signal de test sollicitent principalement la bande passante et le début de la première coupure (zone à -20 dB/décade), le système répondra pratiquement comme si la seconde coupure n'existait pas...
- La dynamo tachymétrique est une petite machine à courant continu. Il s'agit donc a priori d'un système passe bas d'ordre deux. Cependant, cette machine est de petite taille et présente donc une faible inertie. On supposera que la plage de fréquence dans laquelle on va solliciter le moteur est située à des fréquences assez faibles devant les fréquences de coupure introduites par la dynamo. Cette dernière peut donc être représentée comme un simple gain dans cette expérience. Ce capteur est en général très bruité, il va donc falloir filtrer sa sortie avec un passe bas qui élimine une partie suffisante du bruit. On fera cependant en sorte que la fréquence de coupure reste assez élevée devant les fréquences de coupure du système étudié, afin de pouvoir négliger la contribution du filtre dans la dynamique de réponse de l'ensemble. On prendra une fréquence de coupure de 1kHz (justifier ce choix).

• Problème du choix des caractéristiques du signal de test :

Pour identifier la boucle ouverte, le signal d'entrée du système est appliqué à l'entrée de commande du rapport cyclique du hacheur. On fera en sorte d'appliquer un créneau de quelques Hz en entrée (justifier). On choisira une composante continue et une amplitude de créneaux judicieuse.

• Essai préliminaire en boucle ouverte :

Pour une vitesse donnée (à mesurer et à conserver pour la suite) on fait passer la tension d'alimentation du hacheur de 20 V à 18V. Mesurer la variation de vitesse. Pour la même vitesse initiale sous 20V, on fait varier brutalement (d'une façon reproductible pour la suite) la résistance de charge (faire un court circuit d'une partie du rhéostat sur la seconde machine). Mesurer là encore la variation relative de vitesse. Conclusion de ces deux expériences ?

1.1.2. Identification de la boucle ouverte.

La forme, l'amplitude et la fréquence du signal étant choisies, il faut maintenant l'appliquer sur l'entrée de commande du hacheur. On observe la réponse (sortie filtrée de la dynamo tachymétrique). Compte tenu de la réponse, choisir un modèle, le justifier et identifier les paramètres de ce dernier.

1.2. Boucle fermée.

On utilisera le boîtier comparateur/correcteur fourni. Pour avoir une réponse en vitesse indépendante de l'état du système en régime permanent, quel correcteur peut-on réaliser ? Comment choisir le correcteur et ses paramètres ? Dans un premier temps, on calculera le correcteur afin qu'il conduise à un temps de réponse en boucle fermée identique à celui que l'on avait en boucle ouverte.

Une fois la boucle fermée, ajuster le point de fonctionnement afin d'avoir un système qui répond correctement (le signal d'entrée est une simple composante continue). Noter la plage sur laquelle la tension de sortie suit exactement la tension d'entrée. Pour que le système soit asservi, il faudra que la tension de commande reste dans cette plage pour la suite.

Pour un signal de commande à un niveau tel que le système suit, faire varier la tension E, puis la charge de la même façon que lors de l'essai du même type en boucle ouverte. Conclure. Relever jusqu'à quel point on peut

faire varier E , tout en ayant une sortie qui suit parfaitement l'entrée. Pourquoi le système finit-il par décrocher ? De même, observer le transitoire lors d'une brutale variation de couple.

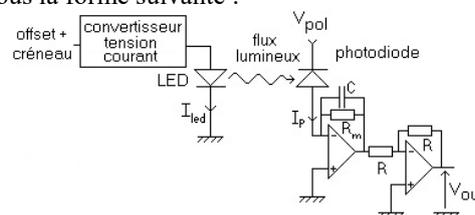
On superpose maintenant un signal en créneaux à la composante continue, en prenant garde de maintenir le signal d'entrée dans la plage. Mesurer le nouveau temps de réponse et comparer au résultat attendu. Que se passe-t-il lorsque l'on augmente le gain du correcteur proportionnel intégral ? Justifier. En cas de problème, n'oubliez pas de jeter un coup d'œil en sortie du correcteur pour voir si les ordres donnés sont réellement pris en compte...

II. Contrôle du flux lumineux reçu par un photorécepteur.

L'objectif de cette expérience est de contrôler le flux obtenu au niveau d'un photorécepteur. Ce flux dépendra de l'éclairage ambiant (attention au 50 Hz des néons !) et du flux émis par une LED. Si cette expérience n'a pas un intérêt direct, elle permet de comprendre comment résoudre certains problèmes concrets comme le contrôle du flux émis par une diode laser.

II.1. Présentation du système.

Le système étudié se présente sous la forme suivante :



Le flux lumineux émis par la LED est contrôlé par le courant I_{led} . Ce courant est commandé par une tension au moyen d'un circuit électronique adapté (réalisé avec un transistor et des amplificateurs opérationnels, Cf annexe). L'objectif est d'avoir un courant suffisamment fort pour qu'un flux lumineux soit émis (mais pas trop car on risquerait alors de brûler le composant).

Le flux lumineux va être émis en direction de la photodiode. Cette dernière va convertir le flux lumineux en courant. Si on néglige le courant d'obscurité, on peut supposer que lorsque la photodiode est polarisée en inverse (ce qui est le cas ici), ce courant est proportionnel au flux lumineux reçu. On fera en sorte que la polarisation inverse soit assez forte (plus de 10V) afin que le temps de réponse du photorécepteur soit le plus rapide possible.

Le courant I_p sera converti en une tension V_{out} (plus facile à visualiser que I_p) au moyen d'un montage transconductance. Ce circuit réalise une simple conversion courant/tension, ainsi qu'un filtrage passe-bas des perturbations.

Pour le convertisseur tension/courant d'entrée de la boucle ouverte, on prendra une résistance $R_o=220\Omega$ alors que pour le convertisseur courant/tension en sortie de la photodiode, on prendra une résistance de mesure de $R_m=33k\Omega$. On travaillera avec la LED bleue.

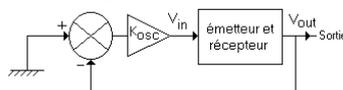
II.2. Méthode d'identification du système.

Dans le cas de cet exemple, on pourrait, comme pour la machine à courant continu, chercher à faire une identification de la boucle ouverte et en déduire un correcteur qui permettrait d'avoir la réponse désirée en boucle fermée. Cependant, dans le cas qui nous intéresse, il apparaît assez rapidement que l'ordre du système est au moins égal à 3 (à cause de la LED, des amplificateurs opérationnels, de la photodiode, de l'amplificateur de courant en sortie). Pour des systèmes d'ordre élevé, il n'est pas évident de déterminer précisément l'ordre auquel on peut se permettre de s'arrêter dans la modélisation (et donc dans l'identification).

Plutôt que de perdre son temps dans de fastidieuses et probablement infructueuses réflexions et expériences, on peut choisir d'adopter une méthode empirique, qui nous conduira directement à un correcteur satisfaisant (PI ou PID). Nous pouvons, par exemple, choisir la méthode de Ziegler Nichols, qui est adaptée à notre système

Méthode de Ziegler Nichols.

- Tout d'abord, on identifie la réponse du système dans des conditions particulières. On fait en sorte de fermer la boucle d'asservissement. Le signal récupéré sur la photodiode est injecté sur l'entrée «-» du comparateur et l'entrée «+» est mise à la masse. En sortie du comparateur, on place un simple correcteur proportionnel de gain réglable. On règle ce gain jusqu'à la valeur K_{osc} pour laquelle on a apparition d'oscillations. On note alors K_{osc} , ainsi que T_{osc} , la période de ces oscillations.



• Ensuite, on déduit des valeurs obtenues, les paramètres caractéristiques du correcteur P.I. qui permet de trouver un bon compromis entre rapidité et stabilité : $K_c = 0,45.K_{osc}$ et $T_c = 0,83.T_{osc}$

rq : on rappelle que le correcteur P.I. a pour fonction de transfert

$$C(p) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{T_c \cdot p} \right)$$

II.3. Travail expérimental.

• Positionnement du système :

Pour que cette expérience fonctionne correctement, il faut que le gain de la chaîne directe soit assez fort, et donc que l'émetteur et le récepteur soient assez proches l'un de l'autre. Placez le récepteur suffisamment proche de l'émetteur pour avoir un gain qui autorise des oscillations une fois la boucle fermée (de quelques mm à qq cm maximum). Pour choisir, on fera en sorte que la méthode de Ziegler Nichols conduise à des oscillations pour un gain de correcteur compris entre 1 et 10.

Si émetteur et récepteur sont trop éloignés, il devient impossible de rendre le système instable à cause des non linéarités. S'ils sont trop proches, les oscillations risquent d'apparaître trop facilement...

rq : on notera que les néons introduisent parfois une perturbation parasite à 100 Hz. Pour éviter ce problème on peut être contraint d'éteindre la lumière ou de cacher un minimum la zone entre émetteur et récepteur... Si émetteur et récepteur sont assez proches, le problème est souvent moins gênant.

• Préambule.

Relever, en continu, la tension récupérée en sortie du montage transconductance (borne V_{out}) en fonction de la tension qui commande le courant injecté dans la LED rouge (borne C1). En déduire la composante continue à appliquer sur V_1 .

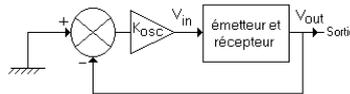
Ceci étant fait, on ne touche plus à V_1 et on applique une tension V_{in} destinée à moduler le signal (c'est par là qu'arrivera l'« information » par la suite). La plage définie précédemment nous indique la limite d'amplitude à ne pas dépasser pour moduler correctement. Compte tenu de la structure du système, on constate que le gain de la boucle ouverte est négatif. Pour avoir un gain positif, on ajoutera en sortie un étage inverseur à amplificateur opérationnel (prendre deux résistances de 10 kΩ environ, un TL081, son courage à deux mains, et câbler soimême sur plaquette).

Pour la valeur de composante continue choisie, relever l'effet d'une lampe de poche sur le signal de sortie (on placera la lampe de poche afin qu'elle provoque une fluctuation d'une dizaine de % de la sortie et on notera cette position pour la suite).

• Exemple d'approche empirique : calcul d'un correcteur P.I. par la méthode de Ziegler-Nichols.

Grâce à cette méthode, nous pourrions calculer les coefficients d'un correcteur P.I. qui devra nous permettre de rendre l'intensité lumineuse reçue par la photodiode insensible (ou moins sensible...) aux perturbations extérieures (approche d'une lampe de poche, variation des caractéristiques de la LED avec la température...). Nous allons utiliser une méthode parmi d'autres, la méthode de Ziegler-Nichols. Cette méthode nécessite de fonctionner en deux temps

- Tout d'abord, on identifie la réponse du système en fermant la boucle d'asservissement avec un correcteur proportionnel de gain réglable et en appliquant en entrée (V_{in}) une tension nulle (pour l'ensemble comparateur/correcteur, Cf annexe ...).
- On part du gain le plus faible et on augmente jusqu'à la valeur K_{osc} pour laquelle on a apparition d'oscillations. On note alors K_{osc} , ainsi que T_{osc} , la période de ces oscillations.



- On en déduit les valeurs des paramètres caractéristiques du correcteur P.I. par les relations suivantes : $K_c = 0,45.K_{osc}$ et $T_c = 0,83.T_{osc}$

• Mise en œuvre du correcteur identifié.

On réalise la boucle et dans un premier temps, on se contente d'une consigne continue. Si le système est bien sans erreur statique, quelle plage de tension peut on envisager en entrée ? On applique alors une tension d'entrée qui satisfait à cette remarque et on observe ce qui se passe lorsque l'on place une lampe de poche comme à la question du préambule. Qu'observe-t-on lorsque l'on regarde l'intensité lumineuse délivrée par la LED ? Que s'est-il passé lors de l'application de la perturbation (surintensité lumineuse) ? Si la perturbation devient trop importante, expliquer pourquoi le système ne suit plus. S'agit-il d'un problème linéaire ?

On fait maintenant en sorte d'appliquer un signal continu auquel on superpose un créneau (on doit toujours faire attention à la plage d'amplitude dans laquelle se situe l'ensemble). Relever le temps de passage à 90% (pour ça, on devra choisir une fréquence de créneaux adaptée). Que se passe-t-il, en terme de rapidité et de stabilité quand on augmente le gain K_c au-delà de ce qui a été défini par Ziegler-Nichols ?

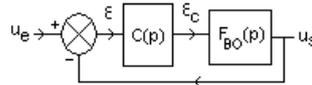
Exercices

Avant la séance de TP suivante, vous rédigerez les réponses aux questions suivantes dans votre cahier de TP.

Question 10-A : On identifie la fonction de transfert d'un ensemble [alimentation continue fixe/hacheur série non réversible/machine à courant continu/dynamo tachymétrique] par une fonction de transfert de type

$$G_{BO}(p) = \frac{K_{BO}}{1 + \tau_{BO} \cdot p} \quad \text{avec} \quad K_{BO}=0.85 \quad \text{et} \quad \tau_{BO}=120\text{ms}$$

On choisit une correction proportionnelle-intégrale $C(p)$ afin qu'en régime permanent, la tension de sortie et la tension d'entrée se suivent parfaitement.



-Expliquer pourquoi, dans ce cas, alors que $u_{s\infty}$ est égale à $u_{e\infty}$, et donc ϵ_{∞} est nulle, on a $\epsilon_{c\infty}$ non nul ce qui explique que $u_{s\infty}$ est non nulle.

-Calculer les caractéristiques d'un correcteur proportionnel intégral qui assure l'absence d'erreur statique pour un échelon en entrée et permet d'obtenir une fonction de transfert en boucle fermée telle que

$$G_{BF}(p) = \frac{K_{BF}}{1 + \tau_{BF} \cdot p} \quad \text{avec} \quad \tau_{BF}=120\text{ms}$$

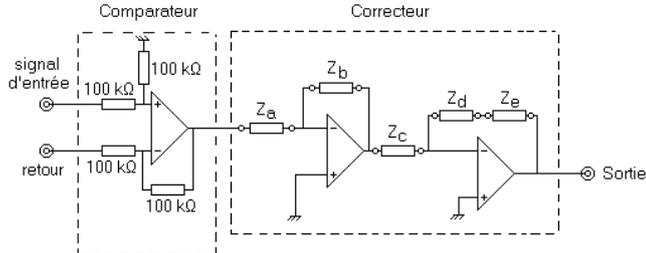
-Quelle est la valeur de K_{BF} et quel est l'intérêt de cette valeur ? Pour un gain trop fort du proportionnel intégral, on peut voir apparaître un dépassement sur la réponse en boucle fermée. Qu'est-ce que ça signifie ?

Question 10-B : On réalise le même système qu'à la question précédente avec une boucle fermée sans erreur statique. Le gain de la dynamo tachymétrique est de 6V pour 1000 tours/min. La commande du hacheur donne un rapport cyclique qui évolue linéairement entre 0 et 1 en fonction de la tension, pour une tension d'entrée comprise entre 0 et 10V. Le hacheur découpe une tension continue de 30V. On supposera que le moteur tourne à 2000 tours par minute pour une tension d'entrée de 40V. On supposera que cette tension et la vitesse évoluent pratiquement linéairement. On supposera qu'il n'y a pas de saturation en courant sur l'alimentation. Calculez la plage de tension d'entrée sur laquelle la sortie du système asservi suit, sans erreur, une consigne constante d'entrée.

Question 10-C : De quoi dépend la plage de réponse des deux systèmes asservis dans le TP ? Expliquez les causes du décrochage de l'asservissement dans les deux cas quand le signal d'ordre donné sort de cette plage.

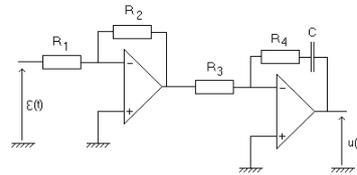
Annexe1: structure du boîtier comparateur/correcteur

- L'ensemble permettant de réaliser le comparateur présente la structure suivante :



Le comparateur est un simple soustracteur à amplificateur opérationnel. L'étage correcteur comprend deux étages inverseurs en cascade. Le gain de l'ensemble est donc positif quand chacun d'eux est utilisé.

- Pour réaliser un correcteur proportionnel intégral on réalisera le circuit suivant



Son gain est

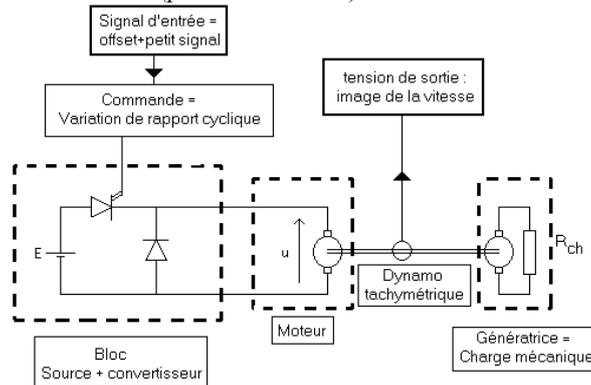
$$C(p) = \left(\frac{R_2 \cdot R_4}{R_1 \cdot R_3} \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{R_4 \cdot C \cdot p} \right) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_c \cdot p} \right)$$

Annexe2 : travail expérimental résumé

Expérience 1 : contrôle de la vitesse d'un moteur à courant continu

a/ Le système en boucle ouverte

- Présentation de la boucle ouverte (prendre $E = 25V$)



Le tension $u(t)$ commande la vitesse de rotation du moteur. Cette tension est une tension en créneau. L'ondulation à la fréquence de hachage est filtrée par la machine. La vitesse de cette dernière ne dépend que de la « valeur moyenne » de $u(t)$ qui évolue au rythme du rapport cyclique fabriqué par la tension d'entrée, c'est à dire très lentement par rapport au hachage. En première approximation, si K est le coefficient de couplage électromécanique du moteur on peut dire que

$$\Omega(t) \approx \alpha(t) \cdot E / K$$

La machine qui fonctionne en génératrice représente une source de perturbation pour la vitesse. Quand R_{ch} diminue, le courant appelé sur la génératrice augmente, ce qui signifie que le couple résistant augmente aussi. La machine aura tendance à ralentir. Quand R_{ch} augmente, c'est le contraire et la machine tend à accélérer. En première approximation, on peut dire que le couple de charge exercé par la génératrice sur le moteur vaut

$$C_{ch} \approx \left(K^2 / R_{ch} \right) \Omega$$

Pour résumer le fonctionnement de la boucle ouverte, on peut dire que

Tension d'entrée $\rightarrow \alpha \rightarrow$ « moyenne » de $u \approx \alpha(t).E \rightarrow \Omega(t)$

Sachant que $\Omega(t)$ peut être perturbée par une variation de E ou C_{ch} .

- *Identification*

- Définir la plage linéaire de fonctionnement du hacheur, en déduire l'amplitude de la composante continue, du créneau ainsi que la fréquence de ce dernier.
- Appliquer ce signal et en déduire le gain statique et le temps de réponse à 63% en utilisant les fonctions de l'oscilloscope.
- *Effet d'une perturbation*
- Réaliser un court circuit reproductible sur la le rhéostat de charge et mesurer l'effet en régime permanent sur la vitesse de rotation.
- Faire varier la tension de l'alimentation stabilisée de 10% et mesurer l'effet sur la vitesse.

b/ Le système en boucle fermée

- *Calcul du correcteur et bouclage*

- Donner la structure du correcteur proportionnel intégral, discussion sur la façon de fixer le gain et la constante de temps (Cf. cours).
- Calculer la constante de temps du correcteur proportionnel intégral qui permet de compenser le pôle principal du système (Cf. cours).
- Calculer le gain du correcteur proportionnel intégral en choisissant, dans un premier temps de garder le même temps de réponse en boucle fermée que celui que l'on avait en boucle ouverte (Cf. cours).
- Intégrer le comparateur et le correcteur dans la boucle... attention, l'entrée n'est plus la même qu'en boucle ouverte !

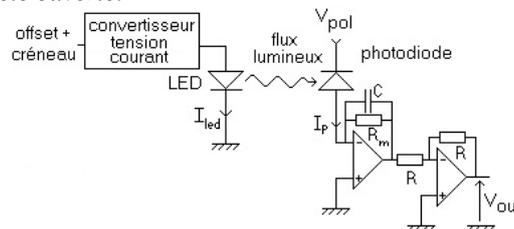
- *Plage d'asservissement*

- Appliquer une tension continue en entrée du système. Mesurer la plage sur laquelle le système suit. Expliquer pourquoi cette plage existe.
- Nous allons désormais appliquer un signal de commande dont la valeur (composante continue et variation) reste comprise dans cette plage
- *Effet d'une perturbation*
- Pour une tension d'entrée constante comprise dans la plage d'asservissement (au milieu), réaliser le même court circuit sur le rhéostat de charge puis la même variation de la tension d'entrée que lors des essais en boucle ouverte. Observer la réponse et expliquer.
- *Etude dynamique, effet de l'augmentation du gain statique du correcteur*
- Pour une tension d'entrée en créneau avec une composante continue adaptée comprise dans la plage d'asservissement, observer l'effet d'une augmentation du gain du correcteur sur le temps de réponse de la boucle, sur la linéarité de sa réponse et éventuellement sur sa stabilité. Conclusion ?

Expérience 2 : contrôle du flux lumineux émis par une LED

a/ Le système en boucle ouverte.

- *Présentation de la boucle ouverte.*



Un convertisseur tension/courant permet de générer le courant injecté dans la LED et donc de contrôler la puissance optique que cette dernière, à partir d'une tension d'entrée. Le flux est détecté par une photodiode, dont le courant de sortie est converti en tension par un circuit à amplificateur opérationnel. Tous ces éléments ont un comportement passe-bas.

On fera en sorte que le courant moyen injecté dans la LED permette à cette dernière de réagir linéairement à la variation de la tension d'entrée.

Par ailleurs, pour conserver un gain statique positif, il faut placer un circuit amplificateur inverseur de gain -1 en sortie du système

- *Présentation et justification de la méthode de Ziegler-Nichols.*

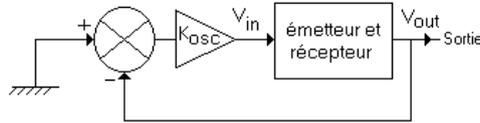
Le système est de type passe-bas d'ordre très élevé. Si on met ce passe-bas dans une boucle fermée avec un amplificateur dont on peut faire varier le gain, on va constater qu'au-delà d'une certaine valeur de ce dernier, des

oscillations vont apparaître en sortie. On a tout simplement réalisé un oscillateur à boucle de réaction. Le correcteur, que la méthode nous donne, va nous permettre de travailler sans oscillations, tout en ayant un gain assez fort pour que le système soit assez rapide.

b/ La boucle fermée.

- *Mise en œuvre de la méthode et élaboration du correcteur.*

Réaliser la structure suivante à partir de la boucle ouverte et du boîtier comparateur/correcteur dans laquelle le correcteur est un simple gain statique positif K_{osc} . L'entrée + du comparateur est mise à la terre.



Noter la fréquence des oscillations et le gain qui conduit à l'apparition de ces dernières. En utilisant les valeurs données par la méthode, réaliser le correcteur et retirer la mise à la terre de l'entrée + du comparateur qui devient l'entrée de commande de la boucle fermée.

- *Plage d'asservissement*

- Appliquer une tension continue en entrée du système. Mesurer la plage sur laquelle le système suit. Expliquer pourquoi cette plage existe.

- Nous allons désormais appliquer un signal de commande dont la valeur (composante continue et variation) reste comprise dans cette plage

- *Effet d'une perturbation*

- Pour une tension d'entrée constante comprise dans la plage d'asservissement (au milieu), écarter lentement l'émetteur du récepteur et observer l'entrée, la sortie et l'état de la LED.

- *Etude dynamique, effet de l'augmentation du gain statique du correcteur*

- Pour une tension d'entrée en créneau avec une composante continue adaptée comprise dans la plage d'asservissement, observer l'effet d'une augmentation du gain du correcteur sur le temps de réponse de la boucle et sur sa stabilité. Conclusion ?

Version septembre 2020