

Asservissement de vitesse d'un moteur à courant continu

- Travail expérimental et rédaction du document :

Jean-Baptiste Desmoulin (P.R.A.G.)

mail : desmouli@physique.ens-cachan.fr

Dans bon nombre de procédés scientifiques et industriels complexes, il est important d'avoir un contrôle sur certains paramètres importants. Nous allons ici traiter de l'exemple classique du contrôle de vitesse d'un moteur, en choisissant l'exemple du moteur à courant continu, en raison de la simplicité du système de commande. L'exemple d'application concrète de l'expérience réalisée, c'est le contrôle de vitesse de l'actionneur principal d'un escalator qui doit maintenir une vitesse constante, quel que soit le nombre de personnes qui l'empruntent.

Il faut noter que la démarche suivie pour le moteur à courant continu peut l'être pour la plupart des systèmes physiques passe-bas, pourvu que leur comportement ne soit pas trop instable... Il suffira de déterminer l'entrée, la sortie et appliquer la même démarche que pour le moteur... seules les causes des limites du modèle linéaire vont changer...

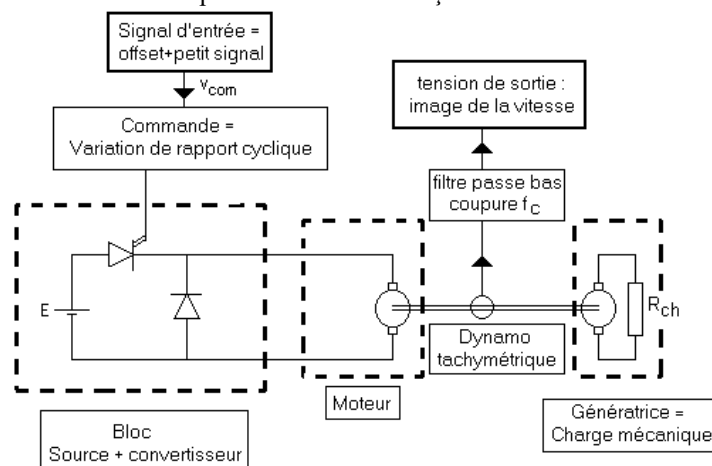
I. Modélisation de la boucle ouverte et discussion.

Le système complet est présenté sur la photographie suivante



1.1. Approche linéaire du problème.

Le système en boucle ouverte étudié se présente donc de la façon suivante :



- L'ensemble (hacheur + moteur) peut être représenté par un filtre passe-bas du second ordre. Nous savons également que dans certains cas particuliers, quand les fréquences de coupure sont séparables, il est possible de négliger les plus élevées. C'est ce que nous ferons en supposant que le système est un passe-bas du premier ordre. On suppose donc que la constante de temps électrique est suffisamment faible devant la constante de

temps mécanique pour être négligée (on fait donc implicitement l'hypothèse que les constantes de temps sont séparables...).

- La dynamo tachymétrique est une petite génératrice à courant continu destinée à fonctionner à vide. On supposera qu'elle est d'inertie suffisamment faible pour être considérée comme un simple gain scalaire dans la plage de fonctionnement étudiée, ce qui signifie que l'on négligera les effets de sa bande passante, potentiellement déstabilisants...

- Pour le filtre de la dynamo tachymétrique (parfois nécessaire car ces systèmes sont très bruités), nous choisirons une fréquence de coupure assez élevée pour pouvoir être négligée lors de l'identification, et assez faible pour pouvoir éliminer une partie des perturbations présentes sur le signal. Une valeur de 1 kHz est satisfaisante dans notre cas. Ceci étant, ce filtre n'est pas toujours nécessaire et il est souvent suffisant d'avoir recours à un moyennage à l'oscilloscope. Pour limiter le bruit, on peut par ailleurs mettre à la masse la carcasse des différentes machines (moteur, génératrice et dynamo tachymétrique) afin d'éviter des couplages capacitifs entre elles.

- *Bilan* : Quand on dit que le système est du premier ordre, c'est que l'on a déjà négligé implicitement les constantes de temps apportées par la dynamo tachymétrique et le filtre qui lui sera associé ainsi qu'une partie de la coupure apportée par le moteur. Simplifier un modèle est une démarche courante. Reste à savoir jusqu'où on peut aller. C'est à l'expérience et au cahier des charges de nous le dire.

Nous verrons par la suite que le choix d'un modèle du premier ordre est assez rapidement contredit par les observations expérimentales. Cependant, si le correcteur déterminé à partir de l'identification de ce modèle simpliste suffit à obtenir une réponse en boucle fermée satisfaisante, notamment en terme de précision, il est inutile d'aller chercher un modèle plus complexe...

1.2. Nature et effet des éléments non-linéaires.

- Le hacheur est l'élément qui permet de contrôler la tension appliquée sur le moteur et donc la vitesse de ce dernier. Pour cela, on agit sur le rapport cyclique. C'est à ce niveau que se situe la principale non linéarité du système. Le rapport cyclique évolue entre 0 et 1 et ne peut pas sortir de cette plage, ce qui signifie que la tension de commande, qui est proportionnelle au rapport cyclique, doit elle aussi rester dans une plage limitée pour que le fonctionnement soit linéaire.

Par exemple, pour le hacheur que nous avons utilisé, on a

$\alpha = 0$ si la tension de commande v_{com} est négative

$\alpha = k \cdot v_{com}$ si la tension de commande v_{com} est comprise entre 0 et 10V

$\alpha = 1$ si la tension de commande v_{com} est supérieure à 10V

Si E est la tension délivrée par l'alimentation stabilisée, la tension appliquée au moteur est comprise entre 0 et E , ce qui correspond à une plage de vitesse bornée, de 0 à Ω_{max} . Si on envoie une tension de commande destinée à conduire à une vitesse supérieure à Ω_{max} , alors le système va réagir de façon non-linéaire et la vitesse restera bloquée à Ω_{max} , avec $\alpha = 1$.

- Par ailleurs, il peut arriver que l'alimentation stabilisée utilisée sature en courant (au courant maximum pour les fortes charges, ou à courant nul à cause de la non réversibilité). On veillera donc, en début d'expérience, à ce que le niveau de courant que peut délivrer l'alimentation soit connu et réglé à une valeur assez forte pour pouvoir satisfaire la charge mécanique maximale que nous sommes susceptibles d'appliquer. Cette dernière dépend de la valeur minimale de R_{ch} et de la vitesse de fonctionnement.

II. Etude de la boucle ouverte.

II.1. choix du signal de test pour l'identification.

En pratique, on va envoyer en entrée du système un signal qui est la somme d'une composante continue (offset) et d'un signal en créneau ayant une période valant quelques constantes de temps du système étudié. La composante continue et l'amplitude des créneaux sont choisis afin d'avoir un comportement linéaire. Par exemple, pour l'identification de la boucle ouverte, si la plage linéaire est entre 0 et 10V, on peut choisir une composante continue de 5V et un créneau d'amplitude 1V crête à crête afin de solliciter le système dans une zone suffisamment éloignée des effets non linéaires. Pour la fréquence des créneaux, on fait en sorte que le fondamental de ce dernier soit dans la bande passante afin de pouvoir identifier correctement la réponse à l'échelon. Dans le cas contraire, la variation est trop rapide pour que le système puisse se rapprocher suffisamment du régime permanent ce qui signifie que les fluctuations d'entrée seront trop fortement filtrées. Dans le cas de l'étude d'un banc de moteur, compte tenu de l'ordre de grandeur des constantes de temps mécaniques, la fréquence des créneaux sera voisine du Hz.

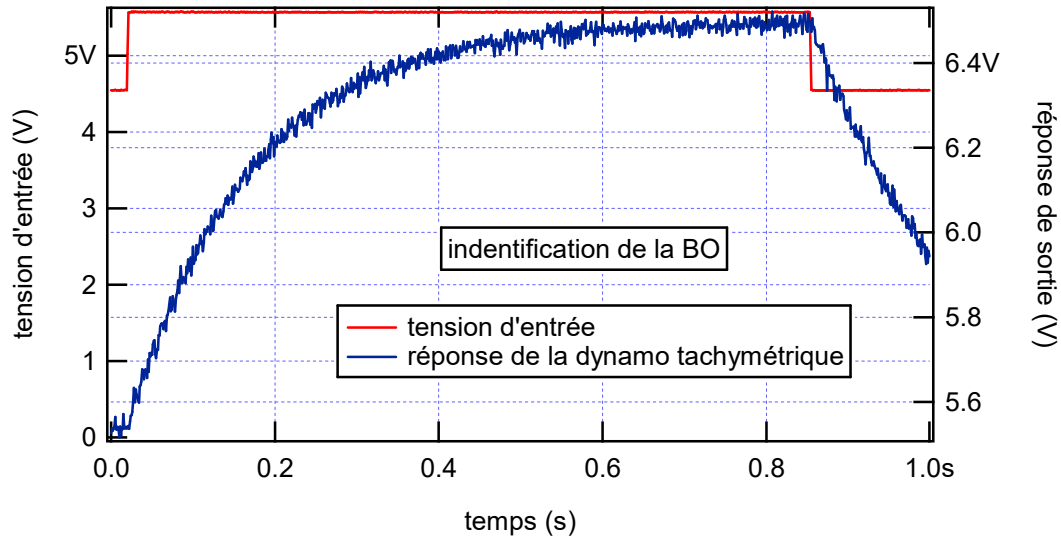
II.2. Identification des paramètres du modèle.

On a mis la tension d'alimentation E à 31,4V et le rhéostat de charge à 51,5 Ω . Dans ces conditions, pour la boucle ouverte sans correcteur, on va chercher à identifier la fonction de transfert suivante :

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

On récupère, à l'oscilloscope, la réponse à un échelon en utilisant tout l'écran et en faisant un moyennage pour éliminer le bruit. Pour τ , on va rechercher directement à l'oscilloscope de temps de réponse à 63%. Pour le gain, on peut appliquer un signal continu, dans la plage linéaire, en entrée, et faire le rapport de la tension de sortie sur la tension d'entrée. On peut également, en régime crête, faire le rapport de l'amplitude de la variation de sortie quand on atteint le régime permanent, sur l'amplitude de la variation d'entrée.

Expérimentalement, à l'oscilloscope, on obtient les courbes d'allures suivantes :



On en déduit

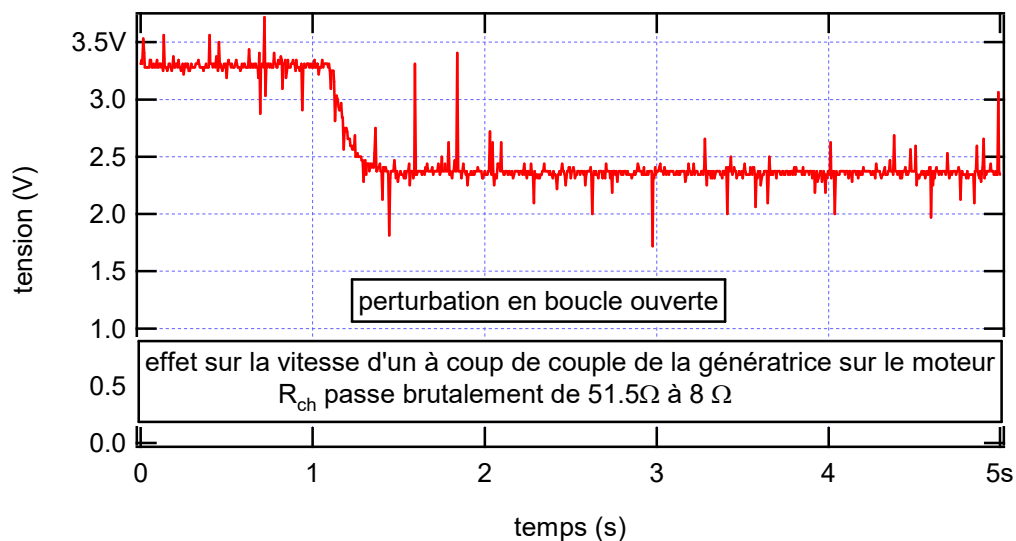
$$\tau = 150 \text{ ms} \quad \text{et} \quad K = 1.2$$

Donc pour l'instant, nous avons

$$v_{com} \rightarrow \frac{K}{1 + \tau.p} \rightarrow v_{\Omega}$$

II.3. Effet d'une perturbation sur la sortie de la boucle ouverte.

Si on réalise un à-coup de couple (variation brutale de la résistance de charge de la génératrice) ou une variation brutale de la tension continue de l'alimentation stabilisée qui fournit la puissance du système, on observe une variation de la vitesse de sortie qui conduit à un nouveau régime permanent en sortie... Sur la figure suivante, on observe l'effet d'une augmentation du couple de charge appliquée par la génératrice sur le moteur qui conduit à une diminution de la vitesse.



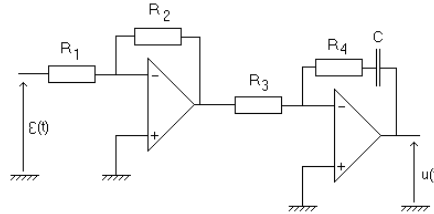
En boucle ouverte, la vitesse dépend donc de l'état physique du système. Dans bon nombre de procédés complexes, ce n'est pas acceptable.

Remarque : le signal présenté sur la figure précédente est fortement bruité, mais dans la mesure où il s'agit d'un signal non périodique, il n'est pas question de moyennner...

II.4. Détermination du correcteur.

Pour faire en sorte que le système soit indépendant des perturbations extérieures comme une fluctuation de la tension de la source de puissance ou du couple de charge, on réalise une correction de type proportionnelle intégrale, ce qui nous permet d'éliminer l'erreur statique.

Ce type de correcteur peut présenter la structure suivante :



Son gain vaut alors

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

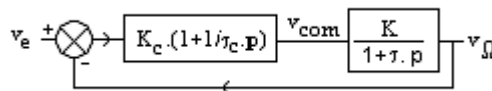
- Pour obtenir une réponse en boucle fermée satisfaisante, on choisit la constante de temps du correcteur pour compenser le pôle du système, c'est-à-dire que l'on prend $\tau_c = \tau$. Dans ce cas, la nouvelle boucle ouverte, avec le correcteur est un intégrateur pur, ce qui signifie que la boucle fermée avec la correction proportionnelle intégrale est un passe-bas du premier ordre avec un gain statique égal à 1. Le système a donc un gain constant dans toute la bande passante ce qui signifie qu'il présente une réponse en régime permanent qui ne dépend pas de ses paramètres physiques comme le couple de charge ou la tension de l'alimentation stabilisée E.

- Pour le gain, si le modèle identifié est satisfaisant, on peut jouer sur K_c pour rendre le système plus rapide. Dans un premier temps, on peut choisir K_c afin d'obtenir le même temps de réponse en boucle fermée corrigée que ce que l'on avait initialement en boucle ouverte sans le correcteur. On va ainsi partir d'un système bouclé assez lent, ce qui va nous permettre d'éviter de faire apparaître les limites de notre modélisation dès le départ. On pourra toujours augmenter le gain du correcteur pour observer les problèmes posés par la suite.

- Avec les paramètres que nous avons choisis, on prendra

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega \quad ; \quad R_2 = 10 \text{ k}\Omega \quad ; \quad R_3 = 150 \text{ k}\Omega \quad ; \quad R_4 = 150 \text{ k}\Omega \quad ; \quad C = 1 \text{ }\mu\text{F}$$

Une fois le correcteur réalisé, on va fermer la boucle. Pour cela, on va utiliser le boîtier correcteur qui comprend le comparateur en plus de la correction proprement dite. On réalise alors la structure suivante :



La nouvelle fonction de transfert en boucle fermée, si notre modèle est acceptable, est donc de la forme :

$$\frac{v_O}{v_e}(p) = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{K \cdot K_c} \cdot p}$$

III. Fermeture de la boucle.

Une fois la boucle fermée, on va appliquer, sur l'entrée de commande, différents signaux pour analyser les propriétés du système bouclé que nous avons réalisé et comparer ses propriétés à celles de la boucle ouverte dont nous sommes partis. Nous allons commencer par déterminer la plage sur laquelle l'asservissement fonctionne. On fera ensuite des tests dans cette plage en régime statique, puis en régime dynamique.

III.1. Précision et plage d'asservissement.

- *Intérêt d'un système précis.*

Avec un gain statique de 1, on peut dire que le régime permanent ne dépend que de l'ordre d'entrée et pas des paramètres physiques (couple de charge, tension d'alimentation de puissance, température...). On notera d'ailleurs que ce qui importe, c'est que le gain statique soit un nombre et non une grandeur dépendant des paramètres physiques... Un gain de 2 aurait tout à fait convenu de ce point de vue. La valeur de ce gain dépend

de l'ordre de grandeur de la tension délivrée par le capteur qui nous donne l'état de la sortie, afin de la rendre facilement comparable au niveau de tension du signal d'ordre en entrée.

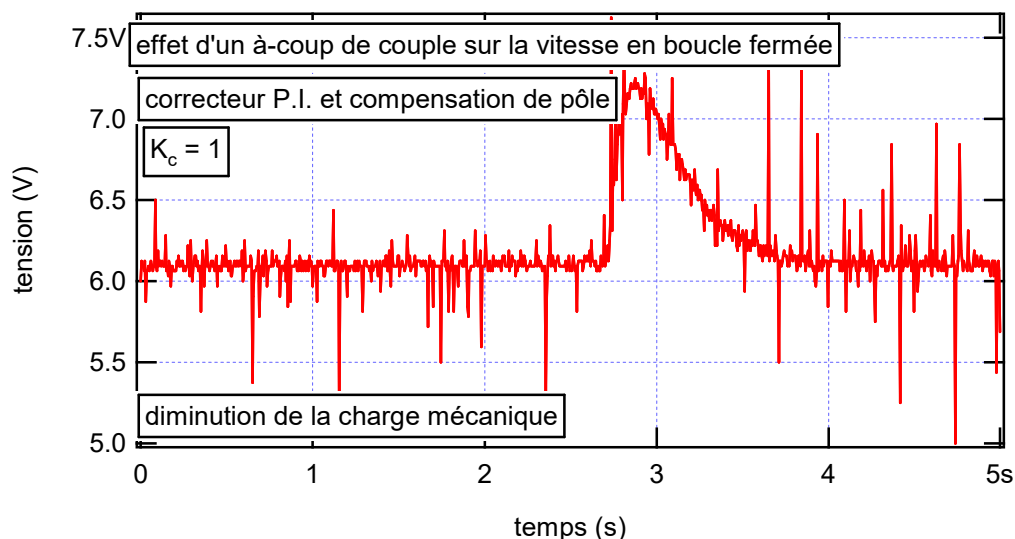
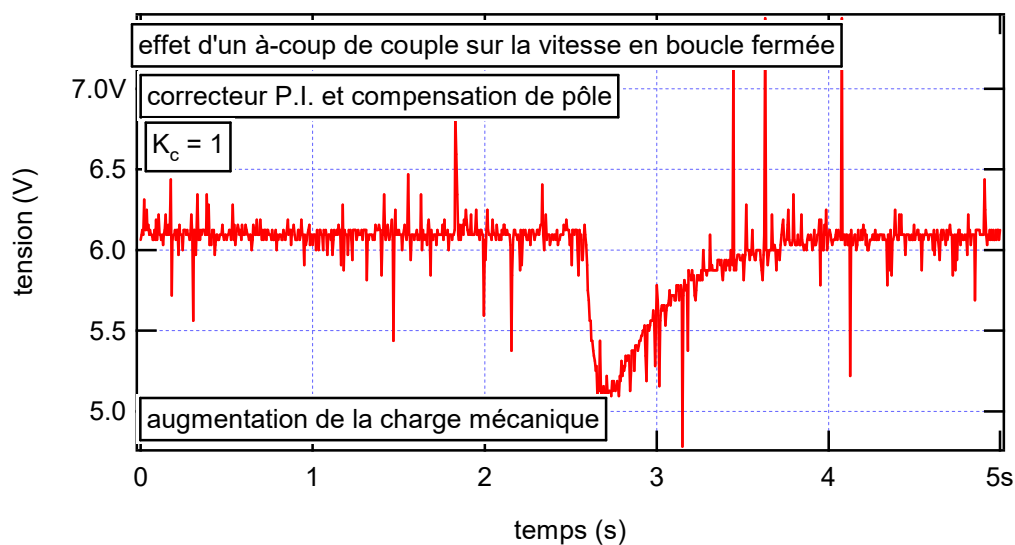
Le système cessera d'être précis dès que certains effets non linéaires vont se faire sentir. La principale limitation, c'est que le rapport cyclique ne peut prendre que des valeurs entre 0 et 1.

- *Limites de la plage d'asservissement : effet des non linéarités.*

Expérimentalement, pour la valeur de E et la résistance de charge choisie, on observe que la tension de sortie suit l'ordre d'entrée sur une plage de valeurs allant de 0V à 9,3V. Lorsque l'ordre d'entrée devient négatif, le rapport cyclique reste bloqué à 0. Lorsque l'ordre dépasse 9,3V, le rapport cyclique reste bloqué à 1.

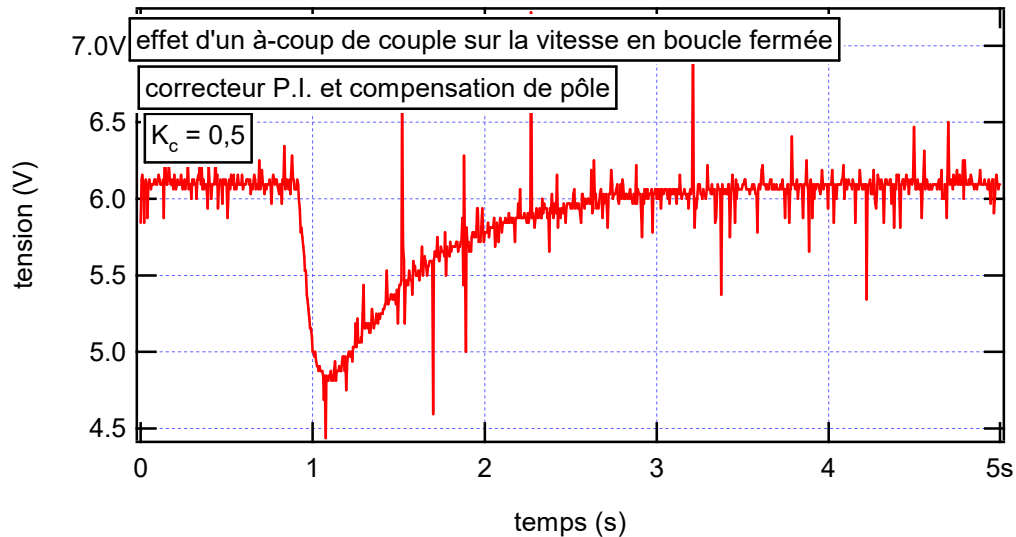
- *Effet d'une perturbation sur un système précis.*

Si on réalise le même à-coup de couple que celui réalisé en boucle ouverte, avec la boucle fermée et la correction choisie, on reviendra à l'état initial après un régime transitoire. Si l'à-coup correspond à une augmentation de charge mécanique, le transitoire conduit à une décélération. S'il correspond à une diminution de charge, le transitoire conduit à une accélération. Sur les figures suivantes, on a représenté l'évolution de la vitesse lors d'à-coups croissants ou décroissants du couple.



Si on augmente le gain K_c , on va diminuer l'amplitude et la durée du régime transitoire. Les effets des perturbations peuvent alors devenir pratiquement invisibles. Cependant, avec notre système des oscillations vont finir par apparaître. En augmentant trop le gain, nous aurons rendu le système instable...

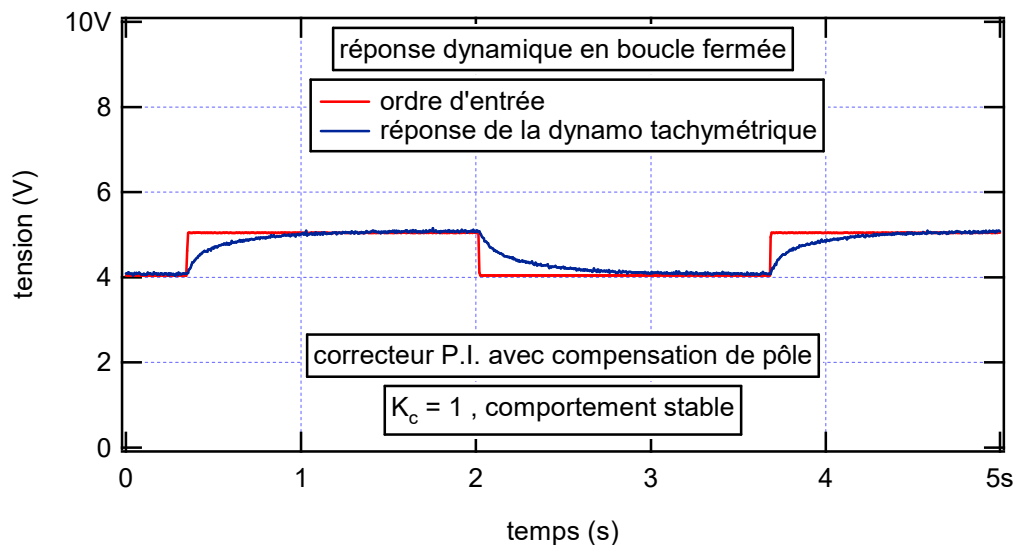
En revanche, pour un gain K_c plus faible du correcteur, le régime transitoire correspondra à une variation d'amplitude plus importante et plus longue.



III.2. Rapidité et plage d'asservissement ; problème de la stabilité.

- *Fonctionnement en boucle fermée en régime dynamique.*

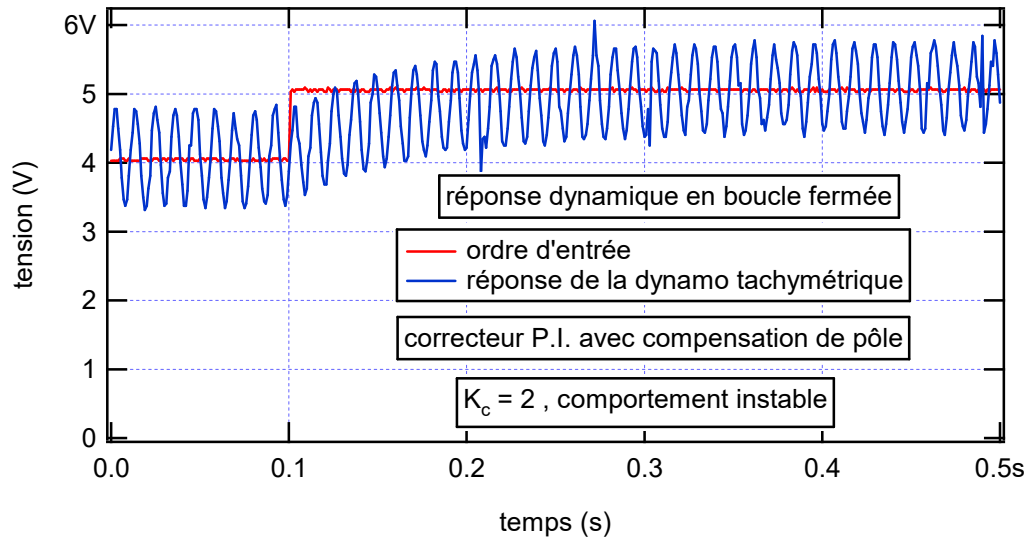
On va solliciter la boucle fermée dans la plage d'asservissement avec un signal variable. Dans un premier temps, on travaille avec $K_c = 1$. Avec un système précis, en moyennant pour éliminer le bruit, on observe les évolutions suivantes



Après le régime transitoire, le signal de sortie finit par suivre l'ordre d'entrée. Le temps de réponse à 63% est de $120 \text{ ms} \pm 10 \text{ ms}$, ce qui est cohérent avec ce qui est attendu avec notre modèle. Cependant, les résultats seront moins satisfaisants si on réalise le test avec des variations d'amplitude plus fortes ou sur un système corrigé présentant un gain K_c plus grand... Les simplifications linéaires sur le modèle choisi, ainsi que différents effets non-linéaires vont alors se faire sentir.

- *Effet de l'augmentation du gain du correcteur sur la réponse :*

Si on réalise la même expérience en augmentant le gain ($K_c = 2$), le système devient instable. Ce type d'évolution signifie que le modèle que nous avons adopté pour la boucle ouverte était simpliste (mais c'est toujours le cas...) puisqu'un système passe-bas d'ordre 1 en boucle ne peut pas devenir instable. En analysant l'ensemble des éléments mis en cascade (machine, hacheur, dynamo tachymétrique...) ce résultat n'est pas surprenant car chacun va contribuer à l'ordre global de la chaîne directe. Expérimentalement, on observe les évolutions suivantes :

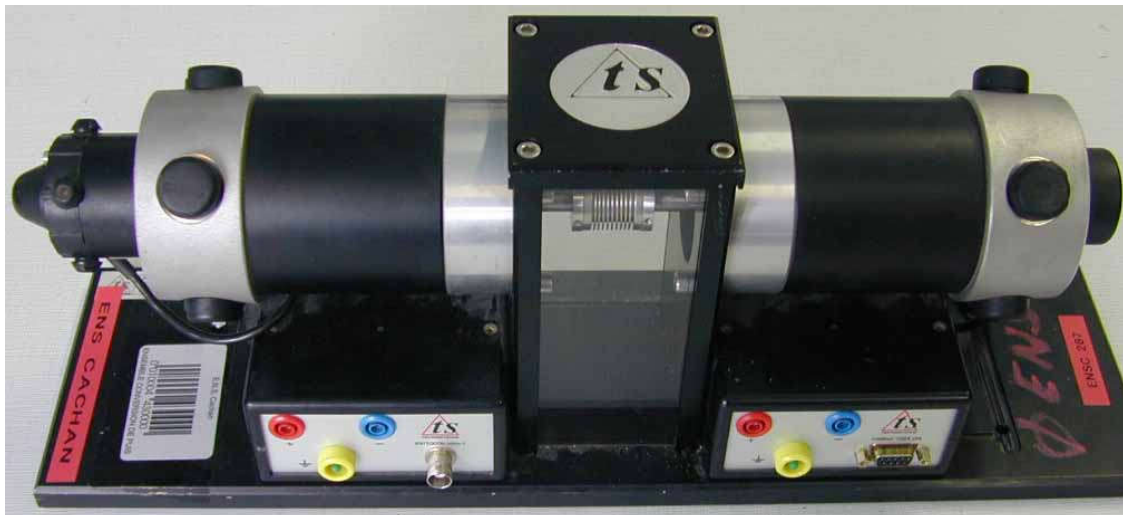


Avec le banc que nous avons utilisé, la dynamo tachymétrique présente une inertie assez voisine du moteur et de la génératrice, ce qui signifie que sa fréquence de coupure est du même ordre que ces dernières. Par ailleurs, les machines utilisées ont une faible inertie mécanique, ce qui signifie que la coupure « mécanique » et la coupure électrique sont très proches et donc qu'une machine devrait plutôt être vue comme passe-bas d'ordre 2... Le système apparaît donc vite comme étant d'ordre supérieur à 3, d'où les oscillations observées si on augmente le gain de la chaîne directe.

Cependant, il faut noter qu'avec certains bancs de machines, cette déstabilisation n'est pas observée. Ces bancs comportent un élément dont la fréquence de coupure est faible devant toutes les autres, ce qui signifie qu'on peut négliger l'incidence de ces dernières sur la réponse de l'ensemble. Le système va donc apparaître comme très stable en boucle fermée et ce sont des effets non-linéaires qui vont empêcher le démarrage des oscillations.

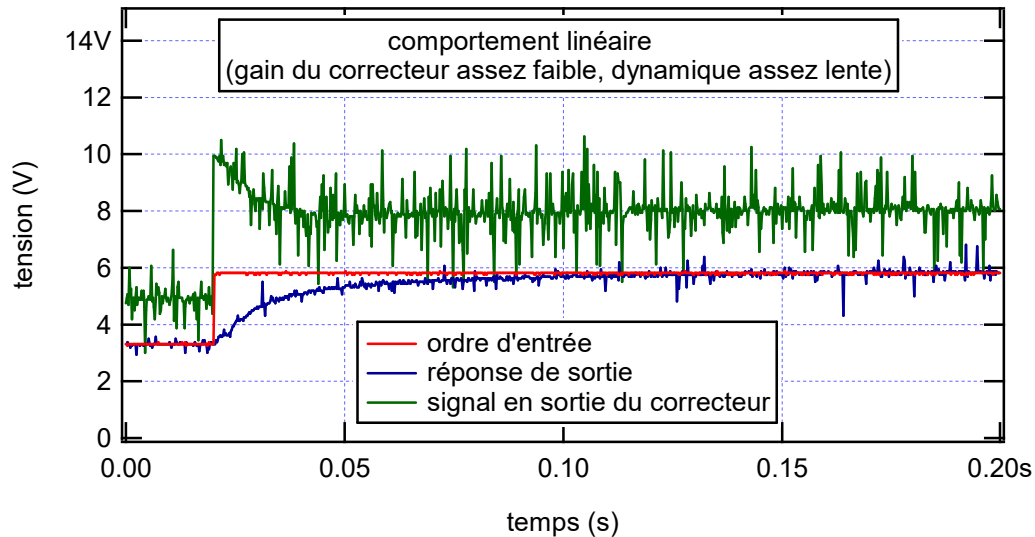
- *Limites non-linéaires des effets de l'augmentation du gain de la chaîne directe.*

Sur les bancs difficiles à déstabiliser (dynamo tachymétrique rapide et inertie mécanique et électrique fortement séparées), on ne va pas observer d'oscillations lorsque l'on va augmenter le gain du correcteur. En effet, la vitesse de réponse va être limitée par des effets non-linéaires avant qu'une oscillation puisse apparaître. Pour observer ces phénomènes, on a travaillé avec le système suivant :

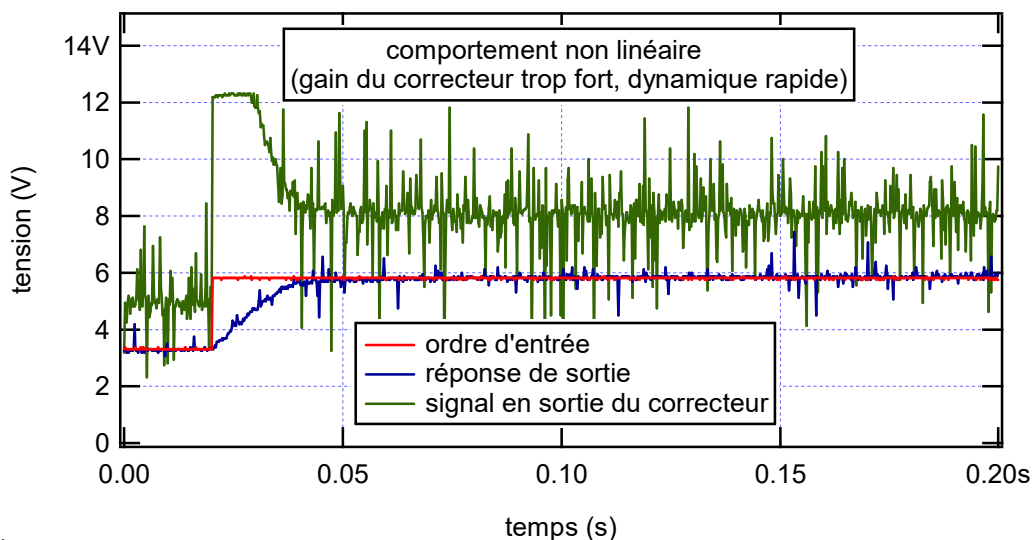


Sur la chacune des deux figures suivantes, on observe l'ordre d'entrée, la réponse en sortie, ainsi que le signal de sortie du correcteur, appliqué en entrée du hacheur. Nous rappelons que ce dernier ne prend en compte que la partie du signal comprise entre 0 et 10V. Tout ce qui sort de cette plage est écrêté par la commande.

Si le gain du correcteur est assez faible, le système répond lentement et le signal de sortie du correcteur reste entre 0 et 10V.



Si le gain du correcteur P.I. augmente, la sortie du correcteur prend des valeurs plus importantes lors des régimes transitoires. On remarque qu'ils sont même écrêtés car le correcteur est réalisé à partir d'amplificateurs opérationnels polarisés entre -15V et +15V. Toute la partie du signal qui est en dehors de la plage 0-10V n'est pas vue par la commande. Il ne sert donc plus à rien, dans ce cas, d'augmenter le gain, car même si le signal de sortie du correcteur est un peu modifié, la partie prise en compte reste, elle, inchangée, ce qui signifie que la réponse de sortie ne sera plus améliorée. On observe que l'évolution de vitesse lors du régime transitoire est pratiquement affine...



Avec ce banc, c'est donc une non-linéarité qui va limiter la rapidité et non le problème de stabilité.

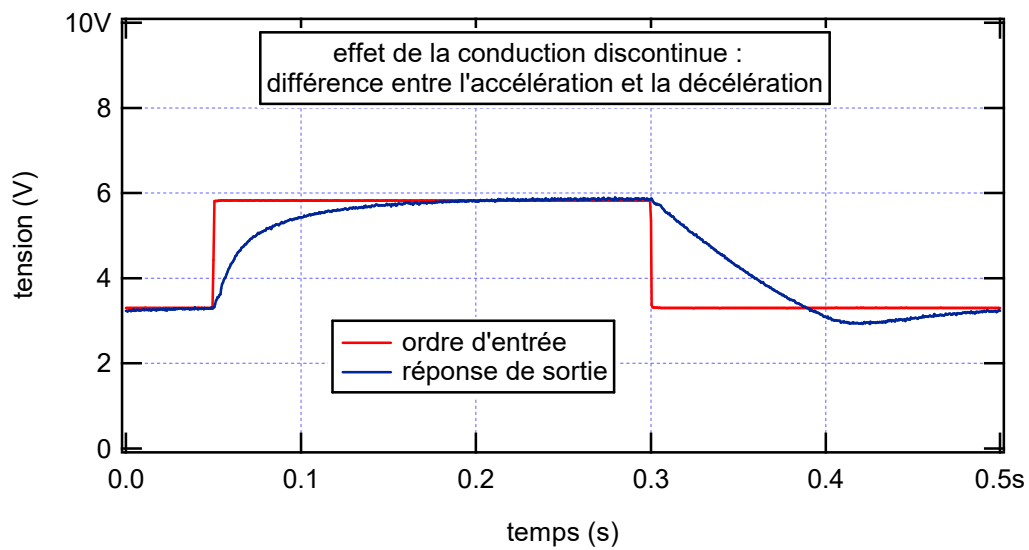
- *Effet non-linéaire dû à la non réversibilité en courant :*

Lors des essais, nous avons fait en sorte que l'alimentation puisse fournir le courant appelé par le moteur sur une plage allant de 0 à 8A qui est la plage de courant supporté par ce dernier en régime permanent.

Lors des phases d'accélération, le moteur appelle davantage de courant et tant que le courant appelé reste inférieur à 8A, l'alimentation n'introduit aucune non linéarité. La réponse ressemble à celle d'un premier ordre si on ne regarde pas trop en détail. Elle est en tout cas linéaire.

Lors des phases de décélération, le courant appelé diminue, mais dans le cas présenté sur la figure suivante, il atteint une valeur nulle. Or, le système n'étant pas réversible en courant, ce dernier ne peut pas devenir négatif et reste à zéro. Il s'agit d'un mode de conduction discontinue. Dans ce cas, lors de la décélération, le système ralentit avec son inertie et ses frottements, comme lors d'un essai de lâché. Lors de cette phase, le système asservi n'a plus de moyen d'action pour accomplir ce qu'on lui demande. Il n'y a plus d'asservissement, tant qu'il n'est pas dans une situation demandant une action qu'il peut accomplir. C'est ce qui arrive à nouveau

lorsque la vitesse devient trop faible devant la consigne. Il faut alors réaccélérer, ce qui demande un courant positif. Le système fonctionne à nouveau en régime linéaire et il rattrape le niveau de consigne.



• **Remerciement.**

Merci à Gilles Feld, PRAG au département E.E.A. de l'ENS de Cachan, pour ses remarques, qui m'ont aidé à rédiger de ce document.

• **Liste de matériel.**

- un banc de moteur avec dynamo tachymétrique.
- un rhéostat de charge $50\Omega / 5A$
- une alimentation continue 35V-10A
- un circuit comparateur-correcteur
- une alimentation +15V/-15V pour polariser les circuits électroniques.
- un oscilloscope Agilent
- un générateur basse fréquence pour les signaux test (qui descend sous le Hz)
- des résistances et des capacités pour réaliser le correcteur
- des câbles BNC et des T
- les fils pour le circuit de puissance.