

Dernière mise à jour	Précision des systèmes asservis	Denis DEFAUCHY
13/10/2021		TD2

Performances des systèmes asservis

TD2

Précision

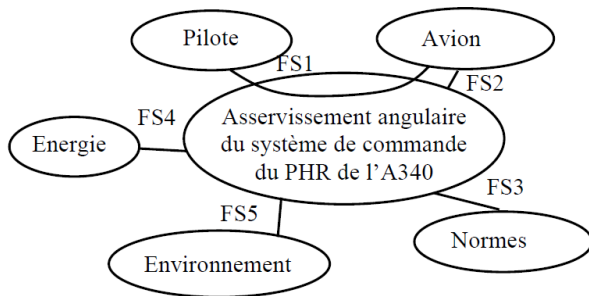
PHR Airbus A340



Programme - Compétences		
B228	Modéliser	<ul style="list-style-type: none"> · Pôles dominants et réduction de l'ordre du modèle ; · Performances et réglages ; · Précision d'un système asservi en régime permanent pour une entrée en échelon, une entrée en rampe, une entrée en accélération ; · Rapidité d'un système asservi : <ul style="list-style-type: none"> - temps de réponse, - bande passante.

Extrait du concours CCP MP 2005

On s'intéresse à l'asservissement en position angulaire du moteur électrique au système de commande du plan horizontal réglable (PHR) d'un airbus A340 dont on donne une description fonctionnelle ainsi qu'un extrait du cahier des charges.

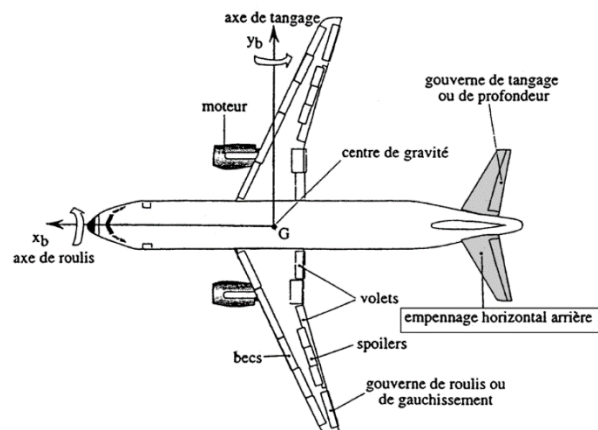


FS1 : Permettre au pilote de piloter en toute sécurité l'avion.
...

FS	Critère	Niveau	Flexibilité
FS1
	Erreur statique	Nulle	Aucune
	Temps de réponse à 5%	$t < 0,2s$	Aucune
	Erreur de trainage	Nulle	Aucune

Le PHR est réglé à l'aide des gouvernes de profondeur. On peut montrer que pour une vitesse donnée, il est possible, par réglage du PHR, de réduire la poussée des réacteurs et donc d'économiser du carburant.

Afin de répondre aux exigences de fiabilité qui stipulent, en particulier, que le PHR doit pouvoir fonctionner durant 10^9 FH (Fly Hour) sans subir de défaillance, un certain nombre de composants de la chaîne de commande du PHR sont doublés ou triplés suivant les cas.

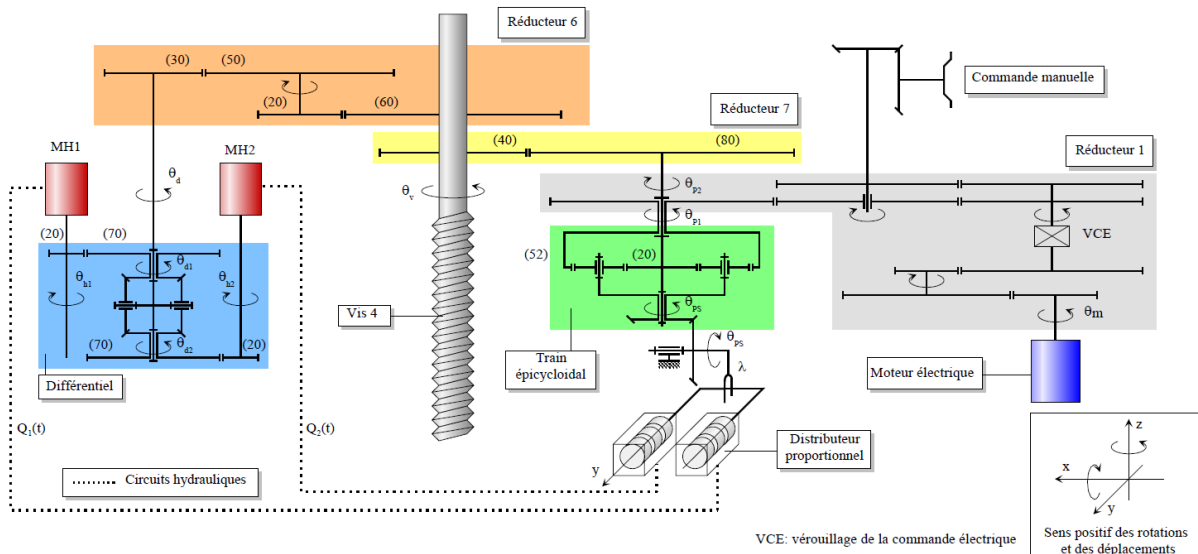


D'autre part, toujours pas soucis de sécurité, le PHR peut être commandé :

- Soit automatiquement par ordinateur de bord qui détermine, à partir des paramètres du vol, la valeur optimale de l'angle β que doivent prendre les gouvernes de profondeur.
- Soit manuellement par le pilote à partir d'un volant de commande situé dans le poste de pilotage et ce, en cas de défaillance de la commande automatique du PHR.

Dernière mise à jour 13/10/2021	Précision des systèmes asservis	Denis DEFAUCHY TD2
------------------------------------	---------------------------------	-----------------------

La figure 1 ci-dessous présente le schéma de principe de la chaîne d'énergie à partir de la génération de la commande par le calculateur ou le pilote jusqu'au PHR.



Le calculateur génère une tension de commande qui va alimenter le moteur électrique (MCC) qui est asservi en position angulaire θ_m pour permettre de générer l'angle de consigne initial θ_{p1} à l'aide du réducteur 1. Toute la suite est un dispositif mécanique complexe et ingénieux assurant la mobilité du PHR. Autrement dit, l'énergie du MCC n'est utile qu'au placement angulaire de la roue dentée θ_{p1} (quasiment sans couple résistant), alors que le dispositif hydraulique est à l'origine de l'énergie qui met en mouvement le PHR via un apport de puissance par les pompes hydrauliques. L'angle θ_{p2} est l'image du déplacement du PHR en sortie, ramenée à l'axe de la roue θ_{p1} . Pour un angle de consigne θ_{p1} assuré par l'asservissement du MCC, un second asservissement mécanique doit assurer $\theta_{p2} = \theta_{p1}$. Nous supposons que l'asservissement mécanique est parfait, c'est-à-dire $|\theta_{p1}| = |\theta_{p2}|$. C'est pourquoi nous n'allons nous intéresser dans ce TD qu'à l'asservissement du MCC avec en sortie la consigne angulaire θ_{p1} du second asservissement.

Voici quelques détails du second asservissement, mécanique, rencontré dans ce système :

- La rotation θ_{p1} permet de commander, via un train épicycloïdal qui joue le rôle de comparateur, les deux distributeurs proportionnels, qui vont délivrer un débit de fluide hydraulique pour alimenter les deux moteurs hydrauliques. En effet, l'utilisation d'un train épicycloïdal est ingénieuse et permet de fermer les distributeurs lorsque $\theta_{p1} = \theta_{p2}$, quelles que soient leurs valeurs.
- Les deux moteurs hydrauliques transforment l'énergie hydraulique des pompes en énergie mécanique de rotation. Deux circuits Pompe/Moteur/Tuyauterie sont utilisés pour palier à l'éventuelle panne de l'un d'eux. L'utilisation d'un différentiel est ingénieuse et permet de :
 - Sommer les puissances mécaniques reçues par les deux moteurs sur l'arbre de sortie θ_d
 - Continuer à transférer l'énergie du circuit fonctionnel en cas de panne de l'un d'eux
- La sortie du différentiel est reliée au réducteur 6 qui va adapter l'énergie mécanique de puissance pour actionner la vis 4, reliée à la gouverne de profondeur et permettant de commander son angle
- L'angle de rotation de la vis 4 est transformée à l'aide du réducteur 7 pour générer le retour de position θ_{p2} qui va permettre de « dire » si la sortie est en bonne position par rapport à l'entrée θ_{p1}

Dernière mise à jour	Précision des systèmes asservis	Denis DEFAUCHY
13/10/2021		TD2

Schéma bloc du système

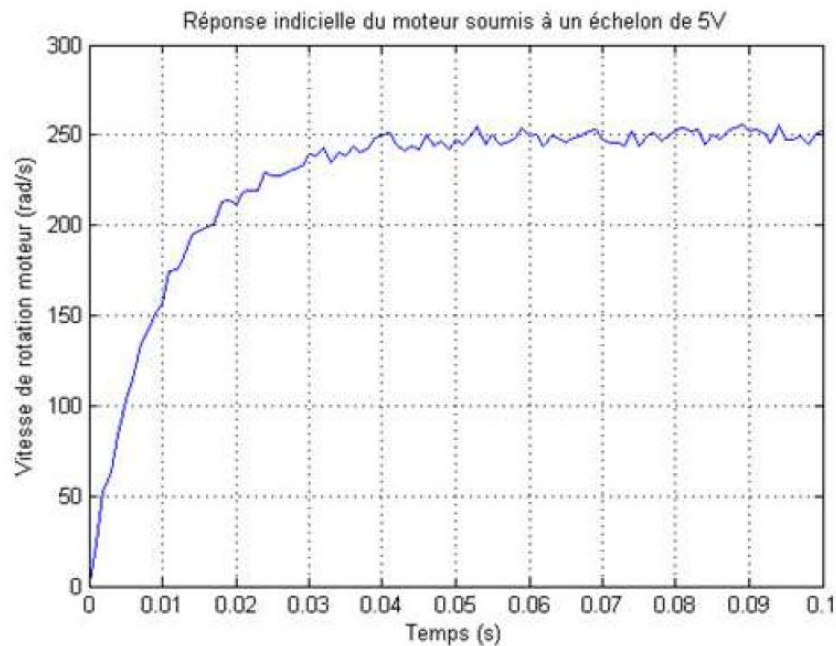
Dans la suite, on ne s'intéresse qu'à la partie génération de commande du PHR. D'une consigne angulaire automatique ou manuelle transformée en tension u_e , on obtient la rotation $\theta_{p_1}(t)$ à l'aide de l'asservissement étudié. Vient ensuite une partie non étudiée ayant pour rôle d'imposer cette consigne au PHR afin d'annuler l'écart angulaire entre $\theta_{p_1}(t)$ en consigne et $\theta_{p_2}(t)$ obtenu réellement. On a alors $\theta_{p_1} = \theta_{p_2}$ et la position du PHR qui sera directement reliée mécaniquement à θ_{p_2} ...

La boucle d'asservissement en position angulaire du moteur électrique étudiée a pour entrée une tension de consigne $u_e(t)$ générée par le calculateur. Cette tension est comparée à la tension $u_r(t)$, image de l'angle $\theta_r(t)$, délivrée par un capteur potentiométrique. L'écart $\varepsilon_1(t)$ est ensuite corrigé et amplifié par un bloc correcteur amplificateur qui fournit la tension $u(t)$ aux bornes du moteur électrique. L'angle de rotation $\theta_m(t)$ en sortie du moteur est réduit par un réducteur 2 pour donner la rotation $\theta_r(t)$ mesurée par le capteur. D'autre part, l'angle $\theta_m(t)$, est réduit par un réducteur 1 pour fournir un angle de rotation en sortie $\theta_{p_1}(t)$, sortie de cet asservissement.

Question 1: Construire le schéma bloc fonctionnel de cet asservissement.

Etude du moteur

Le moteur électrique est un moteur à courant continu. On procède à une identification du moteur en le soumettant à un échelon de tension $U = 5\text{ V}$, afin de déterminer par un modèle de comportement sa fonction de transfert. On obtient la réponse indicielle $\omega_m(t)$ donnée ci-dessous.



Dernière mise à jour	Précision des systèmes asservis	Denis DEFAUCHY
13/10/2021		TD2

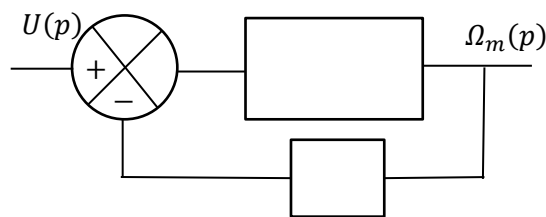
Question 2: Identifier la réponse en justifiant le modèle retenu et la/les technique(s) utilisée(s) pour déterminer les paramètres que vous explicitez.

Pour valider le modèle expérimental, on peut utiliser les équations du moteur à courant continu :

(1)	$u(t) = e(t) + Ri(t)$
(2)	$e(t) = k_e \omega_m(t)$
(3)	$c_m(t) = J_e \frac{d\omega_m(t)}{dt}$
(4)	$c_m(t) = k_a i(t)$

Résistance de l'induit	$R = 1 \Omega$
Inertie équivalente ramenée sur l'arbre moteur	$J_e = 4.10^{-6} kg.m^2$
Constante de force contre électromotrice	$k_e = 0,02 V/(rad.s^{-1})$
Constante de couple	$k_a = 0,02 Nm.A^{-1}$

On propose le schéma bloc suivant :



Question 3: Préciser les 3 choses absentes dans ces équations par rapport au MCC complet vu dans un TD précédent

Question 4: Compléter le schéma bloc proposé

Question 5: Déterminer la fonction de transfert $M(p) = \frac{\theta_m(p)}{U(p)}$ du moteur électrique sous la forme $\frac{k_m}{p(1+\tau_m p)}$

Question 6: Donner les expressions littérales de k_m et τ_m

Question 7: Application numérique : calculer k_m et τ_m en précisant les unités

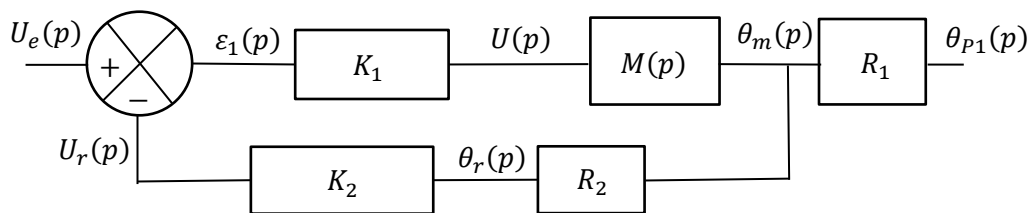
Dernière mise à jour	Précision des systèmes asservis	Denis DEFAUCHY
13/10/2021		TD2

Fonction de transfert du système

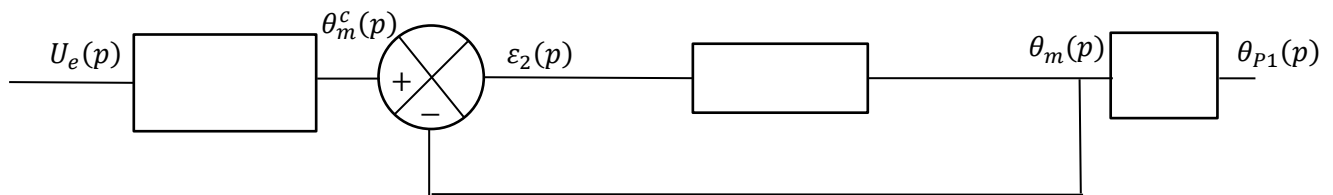
Les fonctions de transfert de différents éléments sont précisées :

- Correcteur amplificateur : Gain K_1
- Capteur potentiométrique : Gain K_2
- Réducteur 1 : Gain R_1
- Réducteur 2 : Gain R_2

Cela donne le schéma bloc suivant :



Question 8: Compléter le schéma bloc suivant afin qu'il soit équivalent à l'asservissement étudié et vérifier que votre solution est correcte



Question 9: Déterminer la fonction de transfert en boucle ouverte $T(p) = \frac{\theta_m(p)}{\varepsilon_2(p)}$, la mettre sous la forme $T(p) = \frac{K_{BO}}{p(1+\tau_m p)}$ et en déduire l'expression du gain de boucle K_{BO} et préciser son unité.

Question 10: Déterminer la fonction de transfert $F(p) = \frac{\theta_{P1}(p)}{U_e(p)}$. Montrer qu'elle peut se mettre sous la forme d'un système du second ordre. On notera K_{BF} le gain statique, z le coefficient d'amortissement et ω_0 la pulsation propre.

Question 11: Donner l'expression littérale de K_{BF} en fonction de R_1 , R_2 et K_2 , de z et ω_0 en fonction de K_{BO} et τ_m .

Dernière mise à jour	Précision des systèmes asservis	Denis DEFAUCHY
13/10/2021		TD2

Détermination des différents gains du système

On cherche dans cette partie à déterminer :

- Le gain du réducteur R_2 : connaissant le nombre de tours que fait la vis en sortie du système, on va remonter au nombre de tours sur l'axe moteur, et donc au rapport de réduction pour imposer un nombre de 10 tours sur le capteur
- Le gain du capteur K_2 d'après ses données
- Le gain K_1 du correcteur qui permettra de respecter le critère de réponse la plus rapide sans dépassement du système

Les données sont les suivantes :

- Rapport de transmission du réducteur 1 : $R_1 = \frac{1}{150}$.
- Longueur utile de la vis : $l = 0,6 \text{ m}$
- Le pas de la vis : $p_v = 10 \text{ mm}$
- La vis est entraînée en rotation par un réducteur dont le rapport de réduction vaut $\frac{\theta_{p2}}{\theta_v} = \frac{1}{5}$ (on ne tiendra pas compte des nombres de dents affichés sur l'image de présentation du sujet).
- Le capteur de position de gain K_2 de la boucle d'asservissement du moteur électrique est un capteur potentiométrique 10 tours dont la tension de sortie varie de -12 à +12 V.

Question 12: Déterminer le nombre de tours N_v maximal que peut faire la vis

Question 13: Déterminer le nombre de tours N_{p2} que va faire l'arbre d'entrée du train épicycloïdal 52.

Question 14: L'asservissement ayant pour but d'annuler l'écart entre $|\theta_{p2}|$ et $|\theta_{p1}|$, en déduire le nombre de tour N_{p1} que doit pouvoir faire le second arbre d'entrée du train épicycloïdal 52

Question 15: En déduire le nombre de tours N_m que va faire l'arbre du moteur.

Question 16: En supposant que l'on utilise le capteur sur toute sa plage (10 tours), déterminer le rapport de réduction R_2 du réducteur reliant la sortie du moteur à l'entrée du potentiomètre.

Question 17: Déterminer le gain K_2 du capteur potentiométrique.

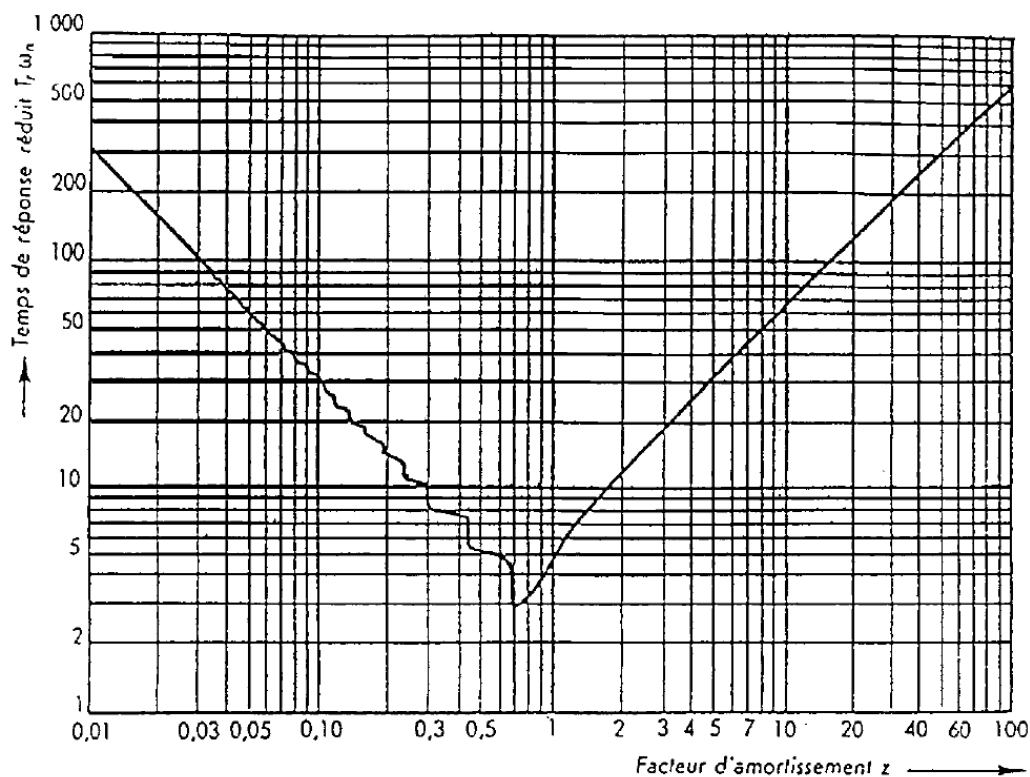
Dernière mise à jour	Précision des systèmes asservis	Denis DEFAUCHY
13/10/2021		TD2

Performance de rapidité

Question 18: Déterminer la valeur du gain de boucle K_{BO} de telle sorte que la réponse θ_{p1} à une entrée en tension u_e de type échelon soit la plus rapide possible sans toutefois produire de dépassement.

Question 19: En déduire l'expression littérale et la valeur numérique du gain K_1 du régulateur permettant de satisfaire l'exigence de rapidité

Question 20: Déterminer le temps de réponse à 5% du système et conclure vis-à-vis du cahier des charges.

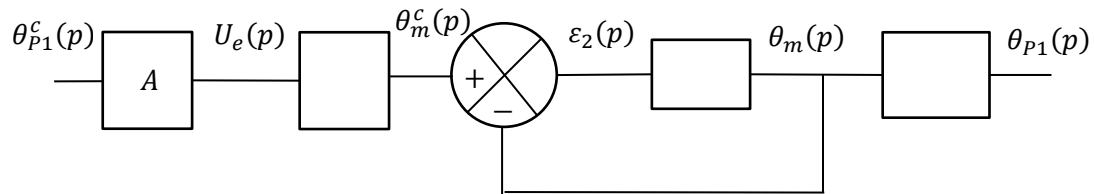


Abaque $T_r \cdot \omega_n = f(\xi)$

Dernière mise à jour	Précision des systèmes asservis	Denis DEFAUCHY
13/10/2021		TD2

Performance de précision

Jusqu'à maintenant, nous avons travaillé avec une entrée de l'asservissement en tension. En réalité, une consigne numérique de position de sortie θ_{p1}^c sera envoyée au système et traduite en une tension U_e . On ajoute donc un bloc adaptateur de gain A tel que :

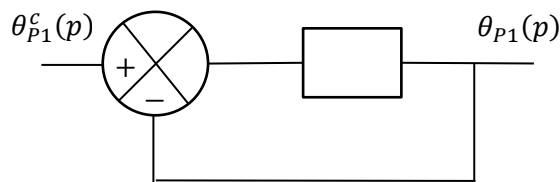


On souhaite choisir A tel que :

- Si $\theta_m = \theta_c^m$, $\theta_{p1} = \theta_{p1}^c$
- Si l'écart au comparateur est nul, l'erreur entrée/sortie est nulle

Question 21: Donner l'expression de A

On propose alors le schéma bloc simplifié suivant :



Question 22: Compléter ce schéma bloc

Question 23: Déterminer l'erreur statique en suivi de consigne et conclure vis-à-vis du cahier des charges

Dans le cas d'une entrée de type rampe $u_e(t) = atu(t)$, le cahier des charges stipule que l'erreur de traînage doit être nulle.

Question 24: Déterminer l'erreur de traînage et conclure vis-à-vis du cahier des charges.

Dernière mise à jour	Précision des systèmes asservis	Denis DEFAUCHY
13/10/2021		TD2

Prise en compte d'un couple résistant

Petit rappel : notre asservissement fait tourner la roue 52, ce qui génère un écart mécanique avec la roue 20 liée à la sortie (mesure de l'asservissement mécanique), il n'y a quasiment aucun couple résistant sur la partie étudiée. L'énergie qui fait bouger la sortie est liée aux pompes hydrauliques dont « le robinet » est piloté par l'écart 52/20.

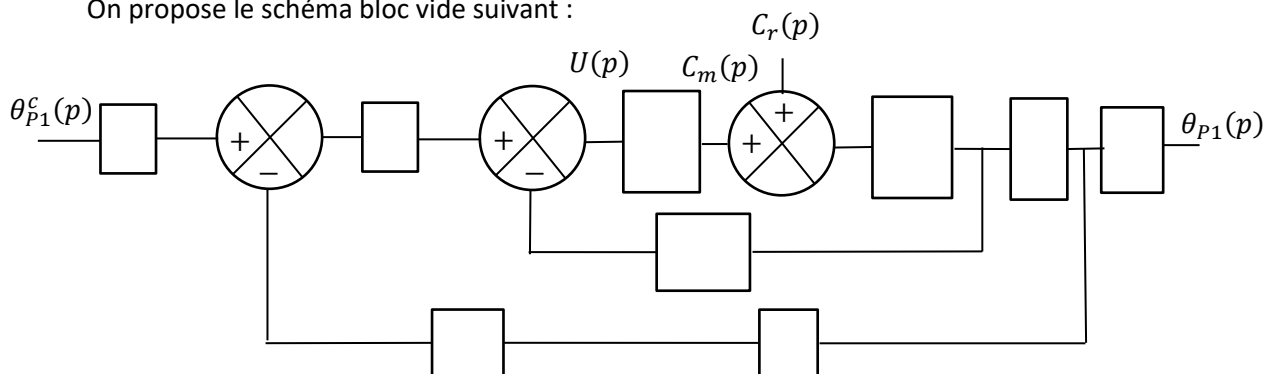
On souhaite ici estimer l'effet d'un couple résistant sur les performances de précision.

On donne :

$$C_{r_0} = -0,1 \text{ N.m}$$

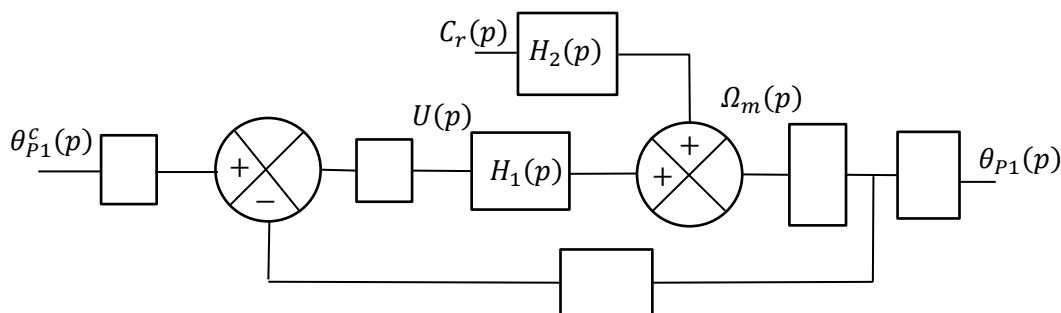
On remarquera qu'il n'est pas possible de reprendre les différents schéma blocs réalisés jusqu'ici puisqu'il est nécessaire d'avoir la somme des couples « accessible ».

On propose le schéma bloc vide suivant :



Question 25: Compléter le schéma proposé

Pour simplifier la suite, on propose le schéma bloc suivant équivalent au précédent :



Question 26: Compléter ce nouveau schéma bloc

Question 27: Déterminer les fonctions H_1 et H_2 en fonction de k_m , τ_m , R et k_a

Question 28: Préciser si la perturbation a une influence sur l'écart statique

Question 29: La présence de H_2 après l'échelon de perturbation change-t-elle votre réponse à la question précédente ?

Question 30: Déterminer l'écart généré par le couple résistant sur la position de sortie en degrés