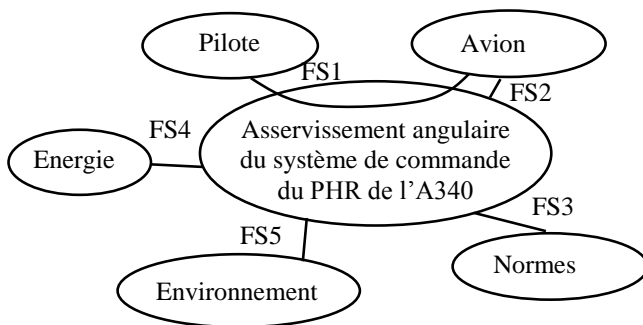


## Etude du plan horizontal réglable (PHR) de l'Airbus A340

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 de cahier des charges.

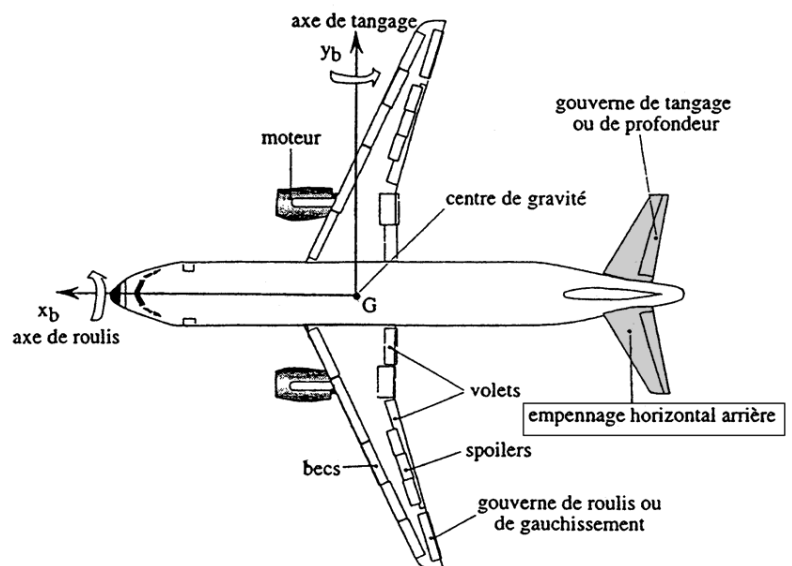


FS1 : Permettre au pilote de piloter en toute sécurité l'avion.  
...

FS	Critère	Niveau	Flexibilité
...	...	...	...
FS1	Erreur statique Temps de réponse à 5% Erreur de trainage	Nulle $t < 0,2s$ Nulle	Aucune Aucune 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 par souci de sécurité, le PHR peut être commandé :

- soit automatiquement par un ordinateur de bord qui détermine, à partir des paramètres du vol, la valeur optimale de l'angle  $\beta$  que doit 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.

La figure 1, placée en annexe, présente le schéma de principe de la chaîne d'énergie à partir de la génération de la commande par le calculateur ou le pilote.

Le calculateur génère une tension de commande qui va alimenter le moteur électrique qui est asservi en position angulaire pour permettre de générer l'angle de consigne initial. Cet angle de consigne initial est adapté à l'aide du réducteur 1. L'angle de sortie du réducteur 1 permet de commander les deux distributeurs proportionnels, qui vont délivrer un débit de fluide hydraulique pour alimenter les deux moteurs hydrauliques. Ces deux moteurs hydrauliques transforment l'énergie hydraulique en

énergie mécanique de rotation. Les deux mouvements de rotation ainsi générés sont additionnés à l'aide du différentiel pour créer un seul mouvement de rotation à sa sortie. La sortie du différentiel est reliée au réducteur 6 qui va adapter l'énergie mécanique de puissance pour actionner la vis 4. La vis 4 est reliée à la gouverne de profondeur et permet de commander son angle.

L'angle de rotation de la vis 4 est capté à l'aide du réducteur 7 qui va l'adapter afin d'être comparé à la rotation de commande des distributeurs à l'aide du train épicycloïdal, qui joue ici le rôle d'un comparateur.

**Q.1.** Compléter le diagramme FAST relatif à la fonction principale régler l'angle du PHR sur le document réponse 1.

La boucle d'asservissement en position angulaire du moteur électrique a pour entrée une tension de consigne  $u_c(t)$  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 et 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  $\theta_{p1}(t)$ , sortie de cet asservissement.

**Q.2.** Construire le schéma bloc fonctionnel de cet asservissement.

Le moteur électrique est un moteur à courant continu. On procède à une identification du moteur en le soumettant à un échelon de tension  $U=5V$ , afin de déterminer un modèle de comportement. On obtient la réponse indicielle (vitesse de rotation  $\omega_m(t)$ ) donnée dans le document réponse 2.

**Q.3.** Identifier la réponse en justifiant le modèle retenu et la (ou les) technique(s) utilisée(s) pour déterminer les paramètres. Les tracés seront laissés apparents sur la figure du document réponse 2.

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

- Equation électrique liant la tension  $u(t)$  aux bornes du moteur et le courant  $i(t)$  le traversant :  
 $u(t) = e(t) + R \cdot i(t)$ ,
- Equation de couplage électrique liant la tension contre-électromotrice  $e(t)$  à la vitesse de rotation  $\omega_m(t)$  de l'arbre du moteur :  $e(t) = k_e \cdot \omega_m(t)$ ,
- Equation de la mécanique liant la vitesse de rotation  $\omega_m(t)$  et le couple moteur  $C_m(t)$ :  
 $J_e \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t)$ ,
- Equation de couplage mécanique liant le couple moteur au courant :  $C_m(t) = k_a \cdot i(t)$ .

Avec :

- $R$  : la résistance de l'induit  $R = 1 \Omega$
- $J_e$  : inertie équivalente ramenée sur l'arbre moteur  $J_e = 4 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2$
- $k_e$  : constante de force contre électromotrice  $k_e = 0,02 \text{ V/(rad/s)}$
- $k_a$  : constante de couple  $k_a = 0,02 \text{ Nm/A}$

**Q.4.** Déterminer la fonction de transfert  $M(p) = \frac{\Theta_m(p)}{U(p)}$  du moteur électrique et montrer qu'elle peut se

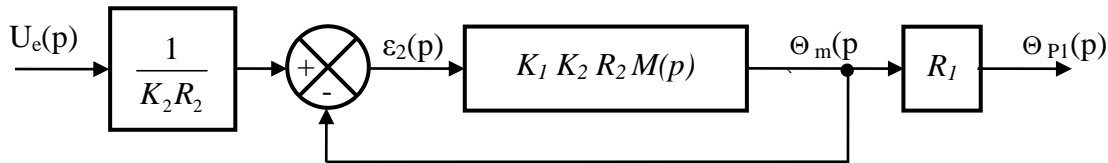
mettre sous la forme d'un intégrateur  $\frac{1}{p}$  multiplié par une fonction de transfert d'un 1er ordre de gain statique  $K_m$  et de constante de temps  $\tau_m$ .

**Q.5.** Donner les expressions littérales de  $K_m$  et  $\tau_m$ .

**Q.6.** Application numérique : calculer  $K_m$  et  $\tau_m$  en précisant les unités.

La fonction de transfert du correcteur + amplificateur peut être assimilé à un gain noté  $K_1$ . La fonction de transfert du réducteur 2 est un gain noté  $R_2$ . La fonction de transfert du réducteur 1 est un gain noté  $R_1$ . La fonction de transfert du capteur potentiométrique est assimilé à un gain noté  $K_2$ .

**Q.7.** Montrer que le schéma bloc peut se mettre sous la forme suivante :



La rapport de transmission du réducteur 1 est  $R_1 = \frac{1}{150}$ .

**Q.8.** Déterminer la fonction de transfert en boucle ouverte  $T(p) = \frac{\Theta_m(p)}{\varepsilon_2(p)}$ , la mettre sous la forme

$$T(p) = \frac{K_{BO}}{p(1 + \tau_m \cdot p)}$$

et en déduire l'expression du gain de boucle  $K_{BO}$ .

**Q.9.** 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 facteur d'amortissement et  $\omega_0$  la pulsation propre.

**Q.10.** Donner l'expression littérale de  $K_{BF}$  en fonction de  $R_1$ ,  $R_2$  et  $K_2$ , de  $z$  et  $\omega_0$  en fonction de  $K_{BO}$  et  $\tau_m$ .

**Q.11.** Déterminer la valeur du gain de boucle  $K_{BO}$  de telle sorte que la réponse à une entrée de type échelon soit la plus rapide possible sans toutefois produire de dépassement.

**Q.12.** Déterminer l'erreur statique du système. Le système est-il précis ? Conclure vis-à-vis du C.d.C.F..

**Q.13.** Déterminer le temps de réponse à 5% du système document réponse 3 et conclure vis-à-vis du C.d.C.F..

On admet que la longueur utile de la vis est  $l = 0,6m$ . Le pas de la vis est  $p_v = 10mm$ .

**Q.14.** Déterminer le nombre de tour maximal  $N_v$  que va faire la vis.

La vis est entraînée en rotation par un réducteur dont le rapport de réduction vaut  $\frac{\theta_{P1}}{\theta_v} = \frac{1}{5}$ .

**Q.15.** Déterminer le nombre de tour  $N_{P1}$  que va faire l'arbre d'entrée du réducteur 52.

**Q.16.** En déduire le nombre de tour  $N_m$  que va faire l'arbre du moteur.

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 Volts.

**Q.17.** 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.

**Q.18.** Déterminer le gain du capteur potentiométrique.

**Q.19.** En déduire le gain  $K_1$  du régulateur connaissant la valeur de  $K_{BO}$  fixée question 11.

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

**Q.20.** Déterminer l'erreur de traînage et conclure vis-à-vis du C.d.C.F..

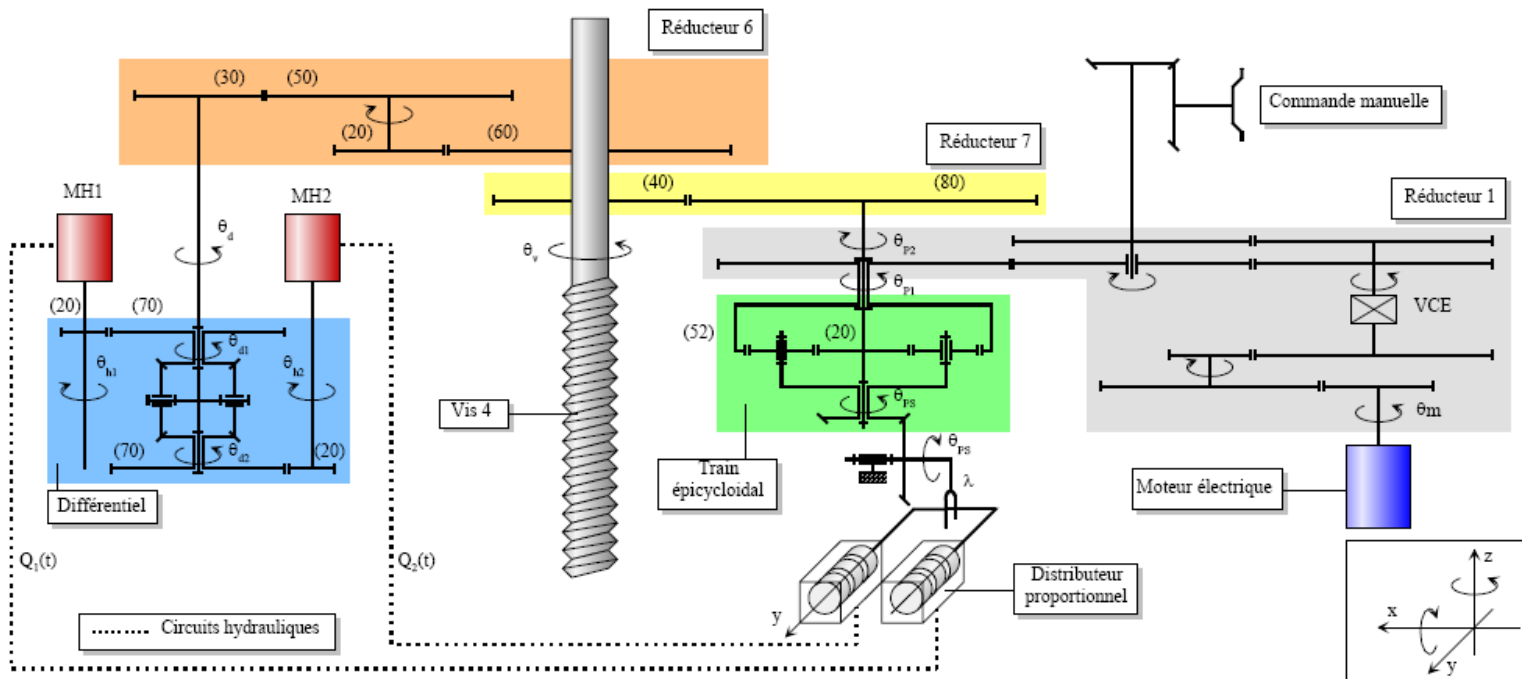
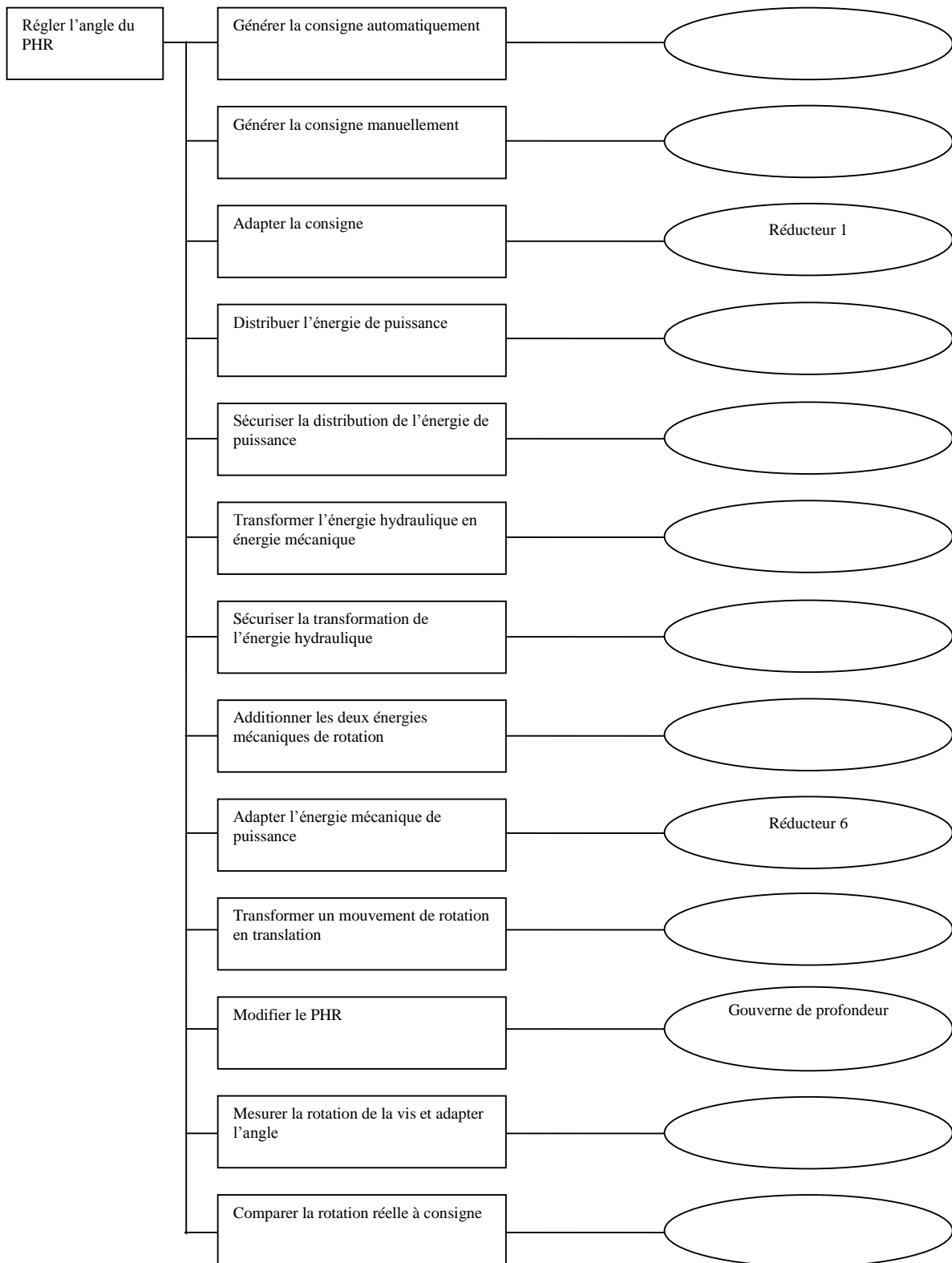
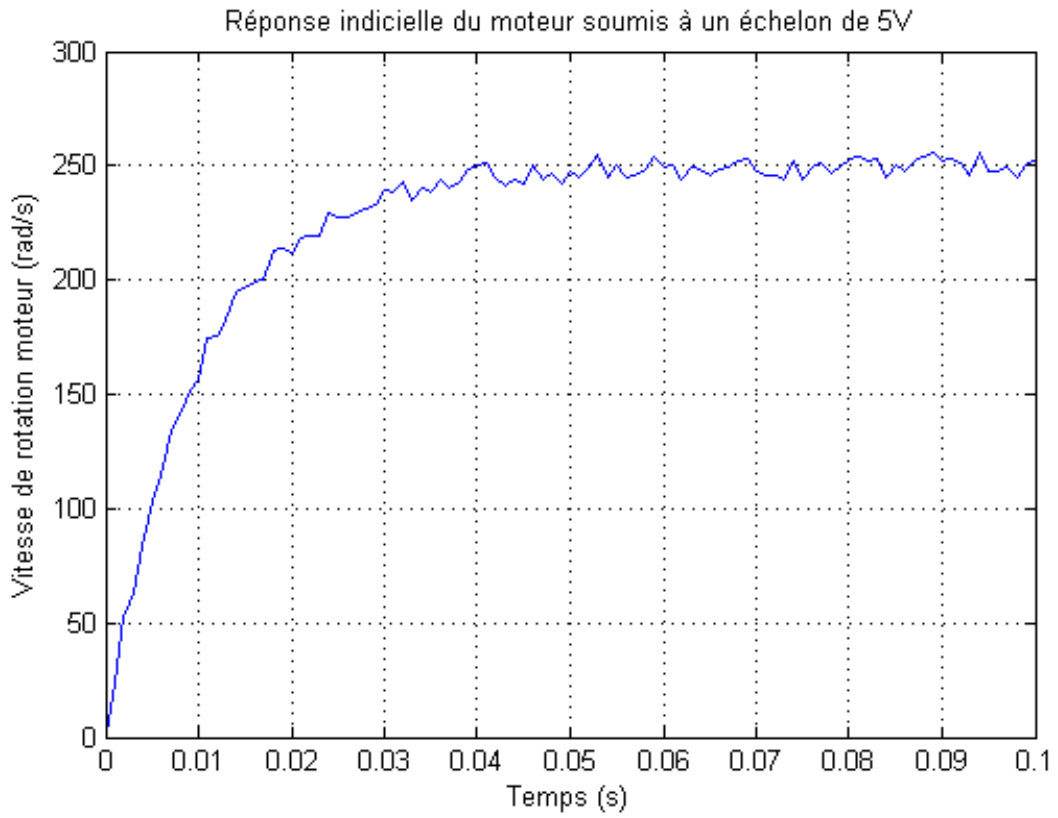


Figure 1

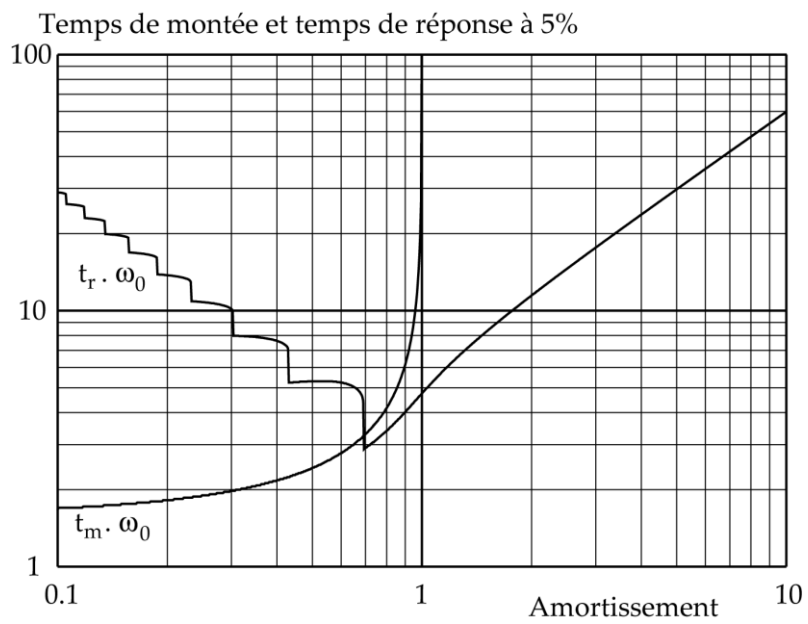
**Document réponse 1.**



**Document réponse 2.**

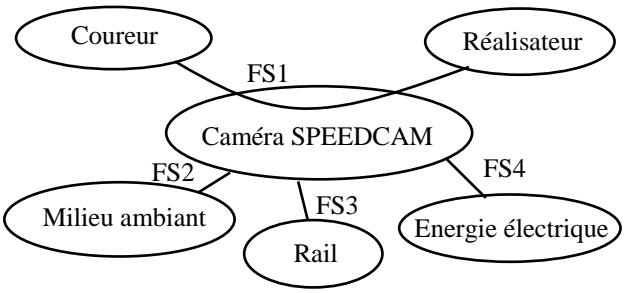


**Document réponse 3**



## Camera de poursuite SPEEDCAM

L'étude porte sur la camera de poursuite SPEEDCAM dont on donne une description structurelle ainsi qu'un extrait de cahier des charges fonctionnel. Cette caméra est notamment utilisée lors des compétitions internationales d'athlétisme pour filmer les coureurs.



- FS1 : Permettre au réalisateur de filmer le coureur
- FS2 : Résister au milieu ambiant
- FS3 : S'adapter au rail
- FS4 : Etre alimentée en énergie électrique

Fonction	Critère	Niveau
FS1	Asservissement en vitesse <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erreur statique</li> <li>• Stabilité</li> <li>• Rapidité</li> </ul>	Nulle Stable $t_{5\%} < 0,5 \text{ s}$
...	...	...

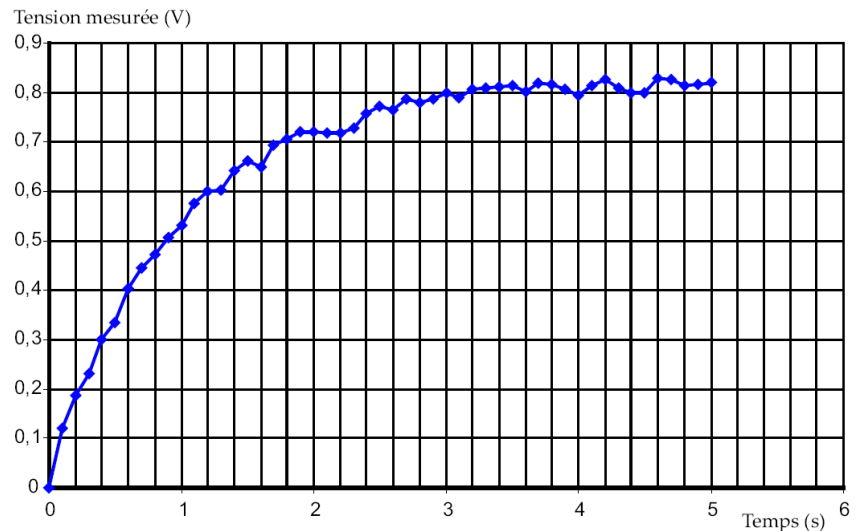
Cette caméra, utilisée aux championnats d'athlétisme pour filmer le sprint final des athlètes en tête de la course, est fixée sur un chariot se déplaçant sur un rail. Cette solution technique permet d'atteindre des vitesses supérieures à 15m/s. Un capteur optique embarqué permet de mesurer la position de la camera par rapport au coureur. A partir de cette mesure, un calculateur détermine la consigne de vitesse  $v_c(t)$  nécessaire pour suivre le coureur. Cette consigne  $v_c(t)$  est transmise sous forme de tension de commande  $u_c(t)$  à l'asservissement du chariot grâce à un adaptateur (Gain : K). Le chariot est actionné par un moteur électrique piloté par sa tension d'entrée  $u_m(t)$ . Cette tension est obtenue à l'aide d'un amplificateur (Gain :  $K_A = 200$ ). Un capteur de vitesse mesure la vitesse  $v(t)$  et renvoi une information de tension  $u_e(t)$  proportionnelle à la vitesse  $v(t)$  (Gain :  $J = 0,3 \text{ V.s/m}$ ). Le chariot est asservi en vitesse.

**Q.1.** A partir de la description structurelle ci-dessus, réaliser le schéma-bloc du système. Définir les fonctions de transfert pour chacun des blocs ainsi que les grandeurs d'entrée et de sortie de chaque bloc (On notera la fonction de transfert du chariot  $H(p)$ ).

**Q.2.** Déterminer l'expression littérale du gain d'adaptation K de façon à annuler l'écart  $\epsilon(t)$  quand la vitesse du chariot et la vitesse de consigne sont égales.

Le modèle de connaissance du chariot est relativement complexe, ce qui ne permet pas de donner a priori un modèle de comportement  $H(p)$  comme pour le capteur de vitesse ou l'amplificateur. Afin de modéliser son comportement, on choisit de faire une mesure et de proposer un modèle simple représentatif. La courbe montre la réponse obtenue par le capteur de vitesse lorsqu'un échelon de tension  $u_m(t) = u_0 \cdot u(t)$  (avec  $u_0 = 70 \text{ V}$ ) est appliqué en entrée.

**Q.3.** Proposer par identification un modèle de comportement pour modéliser le comportement du chariot. Déterminer les paramètres de ce modèle.



On cherche maintenant à caractériser les performances du système asservi.

**Q.4.** Déterminer la fonction de transfert  $\frac{V(p)}{V_c(p)}$  du chariot asservi. La mettre sous forme canonique.

**Q.5.** Déterminer si le système est stable.

**Q.6.** Evaluer la rapidité du système.

**Q.7.** Calculer l'erreur appropriée qui permet de vérifier le critère de précision du C.d.C.F..

Pour améliorer la précision une solution simple consisterait à ajouter un intégrateur dans la chaîne directe en amont de l'amplificateur par l'intermédiaire d'un correcteur intégral  $1/p$ .

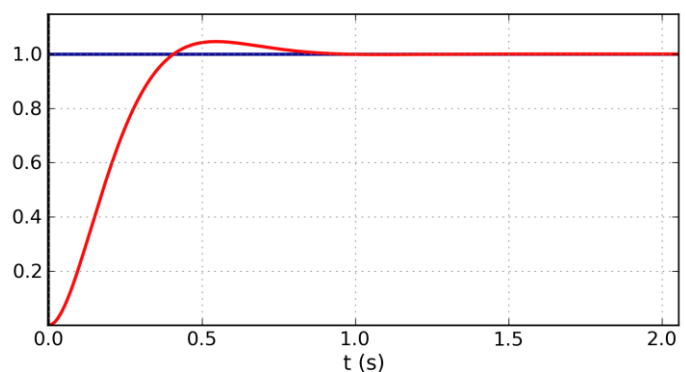
**Q.8.** Déterminer la fonction de transfert  $\frac{V(p)}{V_c(p)}$  du chariot asservi avec correcteur.

**Q.9.** Déterminer si le système corrigé est stable.

**Q.10.** Evaluer la performance en précision du système corrigé. Conclure vis-à-vis du C.d.C.F..

**Q.11.** Déterminer le gain  $K_A$  qui permet d'avoir le système le plus rapide possible. Calculer le temps de réponse à 5% du système corrigé et conclure vis-à-vis du C.d.C.F..

On constate que le système ne satisfait toujours pas le critère de rapidité du C.d.C.F.. En fait la correction du système n'est pas aussi simple que l'ajout d'un intégrateur. L'asservissement est plus complexe car il faut réaliser, en plus de la boucle d'asservissement en vitesse, une boucle d'asservissement en position. On donne la réponse indicielle du système correctement corrigé.



**Q.12.** Conclure quant aux performances du système vis-à-vis du C.d.C.F..