

LYCÉE KLÉBER - STRASBOURG

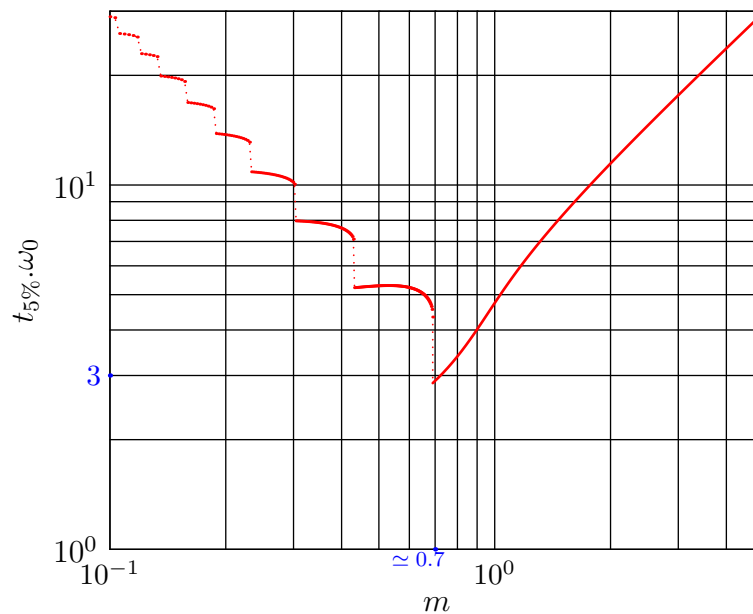
Sciences Industrielles pour l'Ingénieur

Cahier n°5

Systèmes Continus Linéaires Invariants

Modélisation et comportement

Version 2018-2020



Nom :

L. ESCHBACH
P. LECLERCQ
S. LONNI
JD. MOSSER
J. TANOH
R. VINOT

Liste des exercices

Description des systèmes asservis	5
SCL_11 Pilote automatique	5
SCL_12 Régulation de niveau	6
SCL_13 Système de correction d'axe de phare	7
SCL_14 Asservissement de position électro-hydraulique	8
SCL_15 Régulation de température par échangeur	9
SCL_16 Robot ERICC 3	10
SCL_17 Régulation de la température d'un four	11
Manipulation de schéma-blocs	13
SCL_21 Schéma-blocs à une entrée	13
SCL_22 Schéma-blocs à deux entrées	14
SCL_23 Réduction de schéma-blocs	15
SCL_24 Schéma-blocs avec une perturbation	15
SCL_25 Un schéma-blocs complexe	16
Fonctions de transfert	17
SCL_31 Transformée de LAPLACE	17
SCL_32 Calcul de fonction de transfert	18
SCL_33 Moteur à courant continu	19
SCL_34 Machine de rééducation	20
Réponses temporelles des systèmes	20
SCL_51 Réponse d'un modèle du premier ordre	21
SCL_52 Réponse à une succession d'échelons	21
SCL_53 Asservissement d'un petit moteur en vitesse	22
SCL_54 Réponse d'un modèle du deuxième ordre	23
SCL_55 Asservissement d'un moteur en vitesse	24
Réponses harmoniques des systèmes	25
SCL_61 Lieux de transfert	25
SCL_62 Tracé rapide d'un diagramme de BODE	25
SCL_63 Recherche de caractéristiques	26
SCL_64 Diagrammes de BODE	28
Modèle linéaire d'un processus	29
SCL_71 Caractérisation d'un moteur de robot	29
Identification	30
SCL_81 Réponse temporelle d'un thermomètre	30
SCL_82 Réponse temporelle d'un thermocouple	31
SCL_83 Réponse temporelle d'un actionneur	32
SCL_84 Sollicitation d'un vérin hydraulique	34
SCL_85 Trois thermocouples différents	34

SCL_86	Position angulaire d'un bras de robot	35
SCL_87	Un moteur asservi en vitesse	35
SCL_88	Identification à partir de caractéristiques fréquentielles	36
Performances des systèmes asservis		37
SCL_91	Comparaison « boucle ouverte - boucle fermée »	37
SCL_92	Approche graphique de la stabilité	38
SCL_93	Nacelle « H21-TX »	39

SCL_11 Pilote automatique

[t2-4.1>t1-7.1]

L'altitude d'un avion est obtenue par le gouvernail de profondeur, localisé sur la figure 1 ci-dessous. En première approche, on considère la chaîne fonctionnelle destinée au maintien automatique de l'altitude constituée comme suit :

- la partie commande reçoit un signal électrique proportionnel à l'altitude h de l'avion, fourni par un altimètre ;
- le signal précédent est comparé à un signal de consigne proportionnel à l'altitude h_c choisie par le pilote pour donner un signal d'écart ε ;
- un régulateur électrique traite cet écart et délivre un signal de commande u à un actionneur électrique chargé de mouvoir les gouvernes de profondeur.

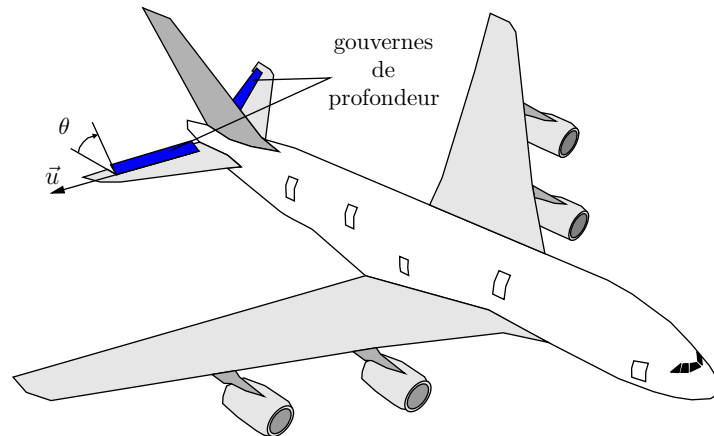


FIGURE 1 – Les gouvernes de profondeur d'un AIRBUS A380

- Q1** À partir du texte de présentation, identifier les différents éléments de la chaîne d'action et de la chaîne d'acquisition, en précisant les grandeurs physiques de chacune des entrées-sorties.
- Q2** Quel élément est soumis à d'éventuelles perturbations ?
Donner un exemple de leurs natures.
- Q3** Tracer le schéma-bloc décrivant la structure de l'asservissement.

SCL_12 Régulation de niveau

[t2-4.2>t1-7.10]

On s'intéresse à une cuve d'eau telle que schématisée sur la figure 1. On souhaite garder son niveau de remplissage constant, alors que le débit de sortie q_s est aléatoire.

Le dispositif étudié comprend :

- une cuve, de section S constante;
- une électrovanne, notée EV , assurant un débit-volume q_e proportionnel à une tension de commande u ;
- un régulateur, dont le rôle est d'élaborer la tension de commande de l'électrovanne u à partir du niveau de consigne et du niveau constaté;
- un capteur de pression, fournissant une tension e proportionnelle au niveau d'eau h ;
- un pupitre, qui permet de donner la consigne de niveau sous la forme d'une tension e_c proportionnelle à la hauteur souhaitée h_c .

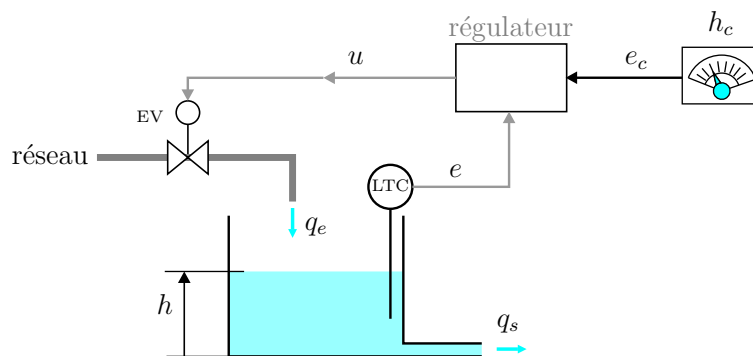


FIGURE 1 – Schéma de l'installation

- Q1** Quelle est la grandeur physique que l'on souhaite contrôler ?
Identifier le processus physique en cause et écrire les équations correspondantes.
- Q2** Tracer le schéma-bloc de ce processus physique et détailler les différentes fonctions de transfert.
- Q3** Le modèle précédent est-il applicable à une cuve sphérique ?
- Q4** Identifier les différents éléments de la chaîne d'action et de la chaîne d'acquisition et tracer le schéma-bloc décrivant la structure de l'asservissement.

SCL_13 Système de correction d'axe de phare

[t2-4.3>t1-8.1]

pub-axe-de-phares-v1

On s'intéresse à un système, embarqué sur un véhicule, qui corrige automatiquement la direction de l'axe de ses phares. On s'intéresse lors d'une première approche aux positions relatives de trois droites particulières, matérialisées sur la figure 1 ci-dessous :

- l'axe des roues, parallèle à la route pour des roues de même diamètre;
- l'axe du châssis, faisant un angle β par rapport à l'axe des roues;
- l'axe des phares, dont on peut régler l'angle d'inclinaison α par rapport à l'axe du châssis.

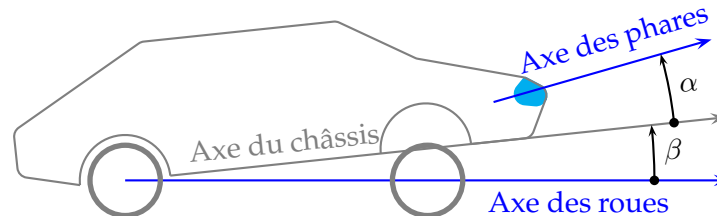


FIGURE 1 – Positions relatives des axes

Le système de correction doit permettre de maintenir le mieux possible l'angle optimal noté φ^* entre l'axe des phares et l'axe des roues. Il comprend :

- un capteur pour mesurer l'angle α , de gain K_α . Il délivre une tension e_α .
- un capteur pour mesurer l'angle β , de gain K_β . Il délivre une tension e_β .
- un mécanisme pour orienter l'axe des phares par rapport à l'axe du châssis, alimenté par une tension de commande u et de fonction de transfert $F(p)$.
- un système correcteur pour élaborer la tension de commande précédente, de fonction de transfert $C(p)$.

Q1 Dans quelles circonstances ce système de correction est-il sollicité ?

Q2 Quelle relation lie les angles α et β ?

Q3 Proposer un schéma-bloc décrivant le système asservi permettant de maintenir l'orientation de l'axe des phares par rapport à l'axe des roues.

Q4 En supposant les gains des deux capteurs identiques, transformer le schéma-bloc pour le rendre à retour unitaire, puis déterminer sa fonction de transfert en boucle fermée.

SCL_14 Asservissement de position électro-hydraulique

On considère un asservissement de position électro-hydraulique dans lequel l'actionneur est un vérin hydraulique. Le système comprend également les composants décrits sur la figure ci-dessous.

exo-asser-electrohyd-position-v1

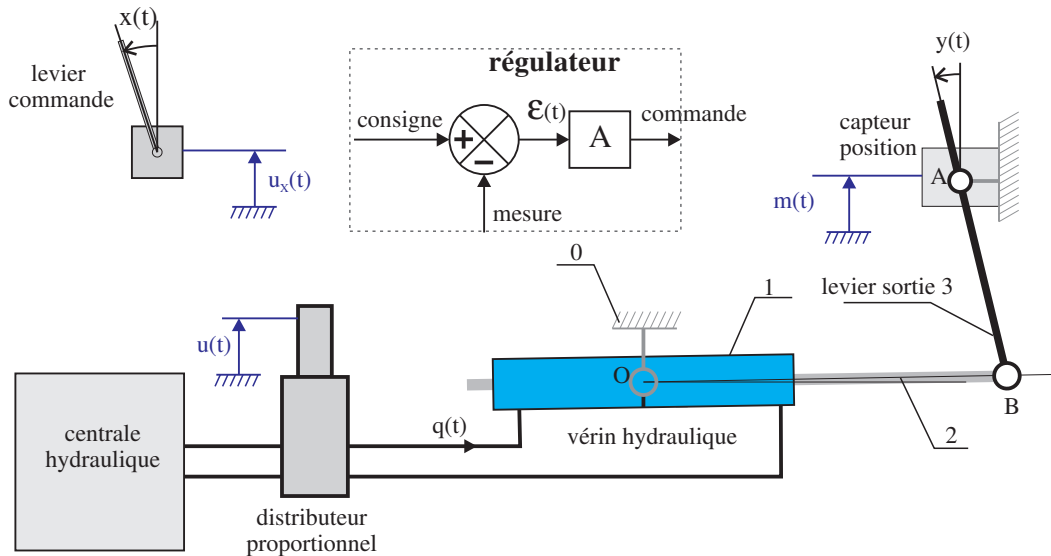


FIGURE 1 – Les différents éléments constituant le système

- Q1** Élaborer le schéma-bloc qui permet la simulation du fonctionnement du système.
- Q2** Préciser les différentes grandeurs physiques posées.

SCL_15 Régulation de température par échangeur

colle-echangeur-v1

On considère un dispositif de régulation de température par échangeur décrit par la figure ci-dessous.

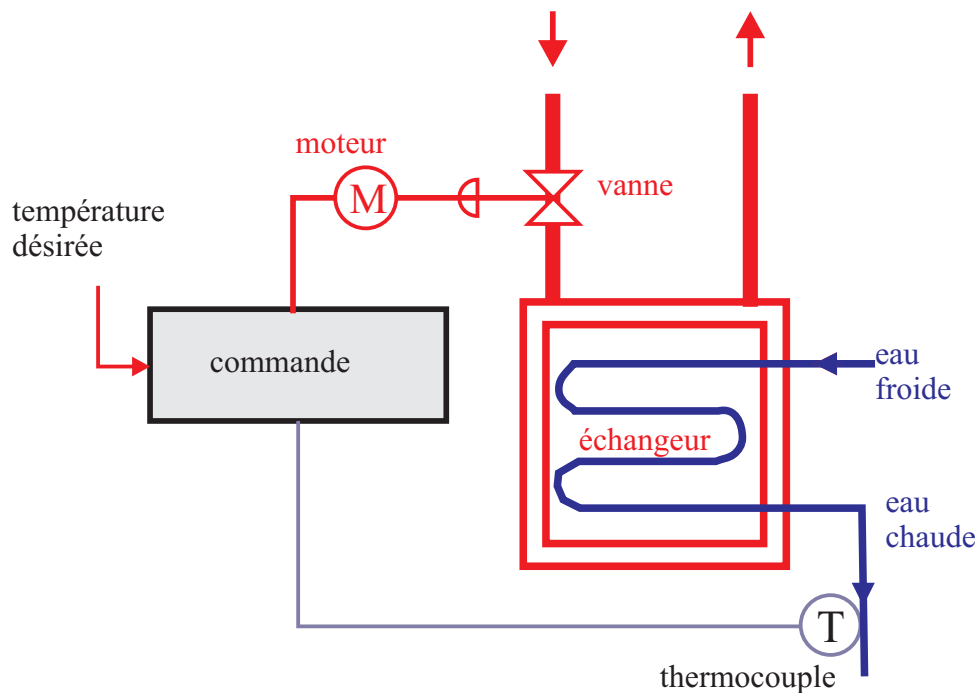


FIGURE 1 – Schéma de mise en situation

- Q1 Réaliser le schéma-bloc commenté de la régulation de température .
- Q2 Quelle grandeur pourrait intervenir dans ce système en tant que perturbation ?

SCL_16 Robot ERICC 3

exo-asservissement-ericc3

Le robot ERICC 3 présenté sur la figure 1 est un robot cinq axes de type anthropomorphique. Il est constitué de trois ensembles :

- Un manipulateur 5 axes.
- Un ordinateur comportant un logiciel de commande et de pilotage et une carte de commande des axes numérisés.
- Un coffret de puissance comportant principalement les amplificateurs de puissance, les contacteurs de freins et l'électrovanne de la pince.

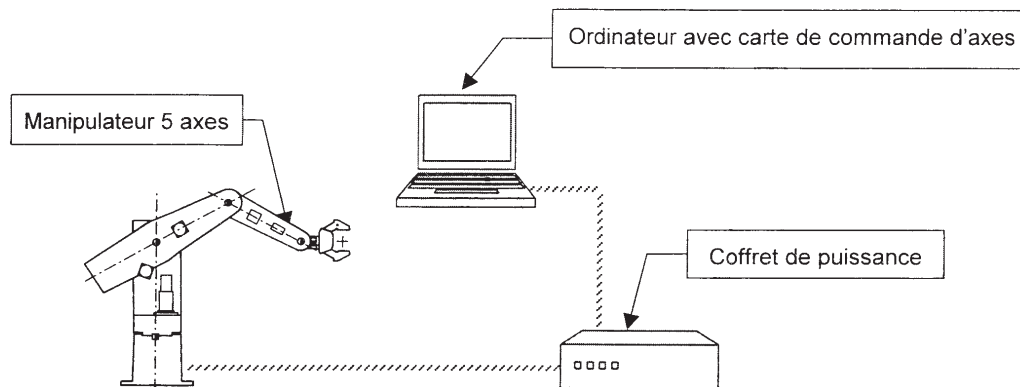


FIGURE 1 – Installation du robot ERIC III

Le mouvement de rotation du bras est créé par un moteur relié à un réducteur à engrenage, un système *poulies courroie crantée* transmet le mouvement de rotation au bras.

Le retour d'information est réalisé par un codeur incrémental installé sur l'arbre de rotation du moteur permettant de mesurer l'angle de rotation de l'arbre moteur.

La consigne de position angulaire du bras $\theta_c(t)$ donnée par l'utilisateur est numérisée en $Nb_1(t)$ par le clavier **CLV**, un convertisseur numérique analogique **CNA₁** permet d'obtenir une tension de consigne $u_c(t)$. Le moteur électrique à courant continu **MCC** est piloté par une carte électronique constituée d'un comparateur et d'un correcteur **COR** qui permet de fournir la tension électrique $u_m(t)$ au moteur (sous-ensemble schématisé ci-dessous). Le moteur **MCC** génère la position angulaire $\theta_m(t)$. Grâce au réducteur **RED** on récupère la position angulaire $\theta_r(t)$. Le système *poulies courroie crantée* **SPCC** permet d'obtenir la position angulaire $\theta_s(t)$ du bras de robot.

Le codeur incrémental **CI** installé sur l'arbre de rotation du moteur permet, par l'intermédiaire d'un composant d'électronique de comptage **CEC**, de mesurer l'angle de rotation de l'arbre moteur sous forme numérique $Nb_2(t)$. Un convertisseur numérique analogique **CNA₂** transforme la mesure numérisée en tension électrique $u_s(t)$.

Q1 Compléter le schéma structurel mettant en évidence les différentes grandeurs physiques et les systèmes physiques utilisés pour réaliser l'asservissement en position du bras de robot décrit ci-dessus.

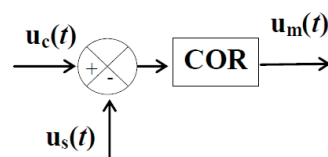


FIGURE 2 – Ébauche du schéma structurel

SCL_17 Régulation de la température d'un four

exo-four-v1

Soit à étudier l'asservissement de température présenté sur le schéma de principe de la figure 1 ci-dessous :

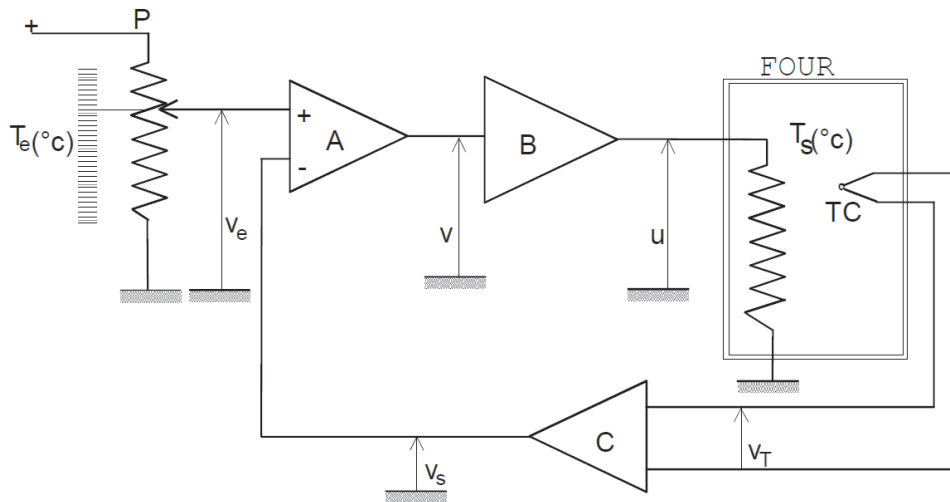


FIGURE 1 – Schéma de principe de la régulation

- **P** est le potentiomètre d'entrée permettant de fournir la consigne.
- **TC** est un thermocouple utilisé comme capteur de la température à l'intérieur du four.
- **A**, **B** et **C** sont des amplificateurs électroniques.

Le four est à chauffage électrique, l'étude des différents éléments constituant cette régulation a permis d'établir les relations suivantes :

- Pour le potentiomètre **P**

$$V_e(p) = k_e T_e(p)$$

- Pour les amplificateurs **A**, **B** et **C**

$$V(p) = k_a (V_e(p) - V_s(p)) \quad U(p) = k_b V(p) \quad V_s(p) = k_c V_T(p)$$

Les paramètres k_e , k_a , k_b , k_c sont des constantes.

- Le four est caractérisé par une fonction de transfert de la forme

$$\frac{T_s(p)}{U(p)} = \frac{k_f}{1 + \tau_1 p}$$

T_s est la température à l'intérieur du four et U la tension d'alimentation des éléments chauffants fournie par l'amplificateur de puissance **B**.

- Le thermocouple **TC** délivre une tension V_T , sa fonction de transfert étant de la forme

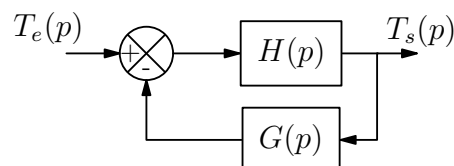
$$\frac{V_T(p)}{T_s(p)} = \frac{k_T}{1 + \tau_2 p}$$

Q1 Schéma-bloc détaillé

Dessiner le schéma-bloc détaillé de cet asservissement en faisant apparaître les fonctions de transfert de chaque élément, ainsi que les différentes grandeurs physiques.

Q2 Schéma-bloc simplifié

Montrer que ce schéma bloc peut se ramener à celui d'un système bouclé de la forme ci-contre :
Donner l'expression des transmittances $G(p)$ et $H(p)$.



Q3 Fonction de transfert en boucle fermée

Calculer l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée

$$L(p) = \frac{T_s(p)}{T_e(p)}$$

Faire l'application numérique

$$k_e = 0,05 \text{ V}/^\circ\text{C}; k_f = 4^\circ\text{C}/\text{V}; k_a = 4,5; \tau_1 = 40 \text{ s}; k_T = 40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}; k_c = 1250; \tau_2 = 1 \text{ s}$$

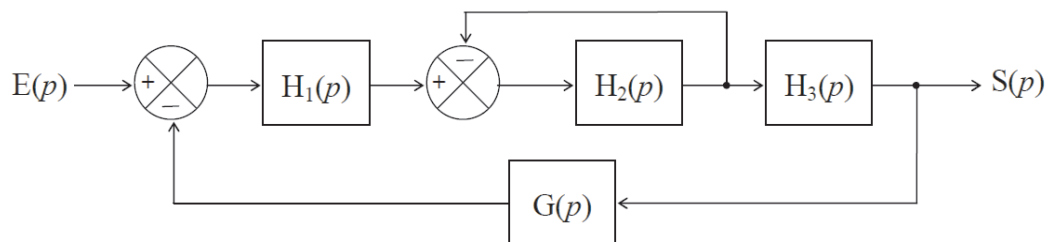
SCL_21 Schéma-blocs à une entrée

Les schémas-blocs des figures ci-dessous comportent une entrée $E(p)$ et une sortie $S(p)$. Pour chacun des schémas-blocs, déterminer l'expression de la fonction de transfert $F(p) = S(p)/E(p)$ par :

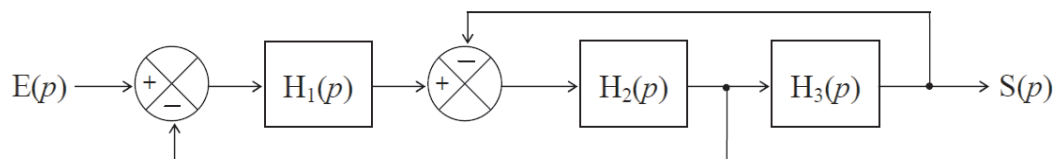
- réduction du schéma-bloc;
- calcul.

exo-schema-blocs-1

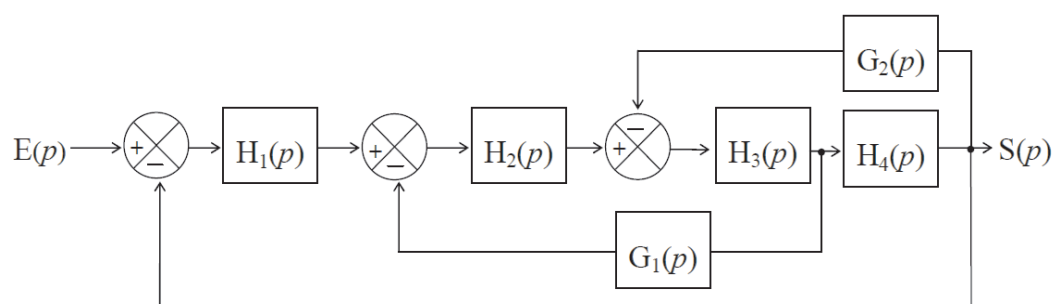
Cas de 2 boucles concentriques



Cas de 2 boucles imbriquées



Cas de 3 boucles imbriquées



SCL_22 Schéma-blocs à deux entrées

exo-schema-blocs-2

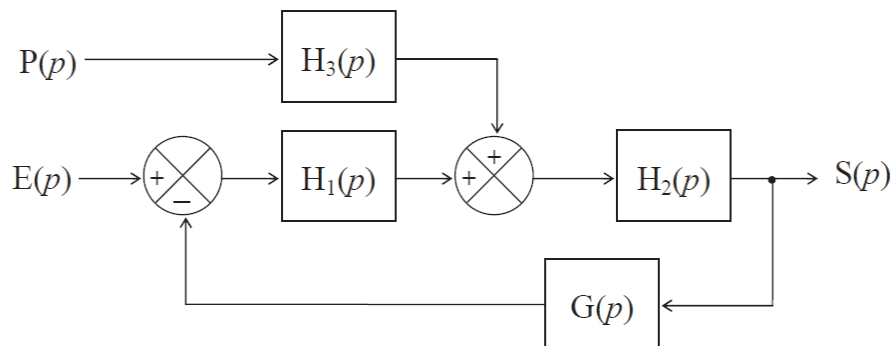
Les schémas-blocs représentés par les figures ci-dessous comportent deux entrées $E(p)$ et $P(p)$ et une sortie $S(p)$. On peut considérer dans chaque cas deux fonctions de transfert $F_1(p)$ et $F_2(p)$ telles que

$$S(p) = F_1(p) E(p) + F_2(p) P(p)$$

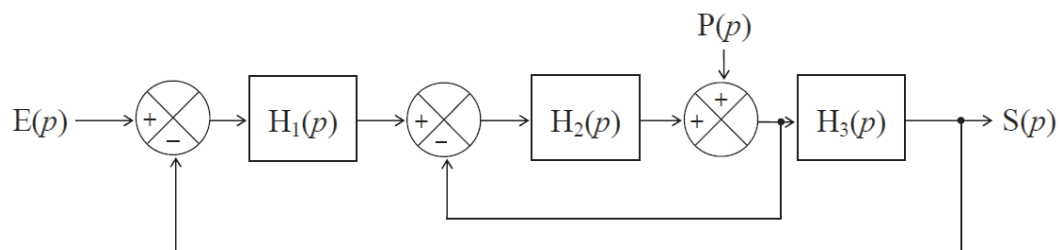
Dans chaque cas, déterminer l'expression de ces deux fonctions de transfert par :

- réduction du schéma-bloc;
- calcul.

Cas de deux entrées et une boucle



Cas de deux entrées et deux boucles concentriques



SCL_23 Réduction de schéma-blocs

[exo-5.5]

Réduire le schéma-bloc de la figure 1 ci-dessous

pub-exo-108-v1

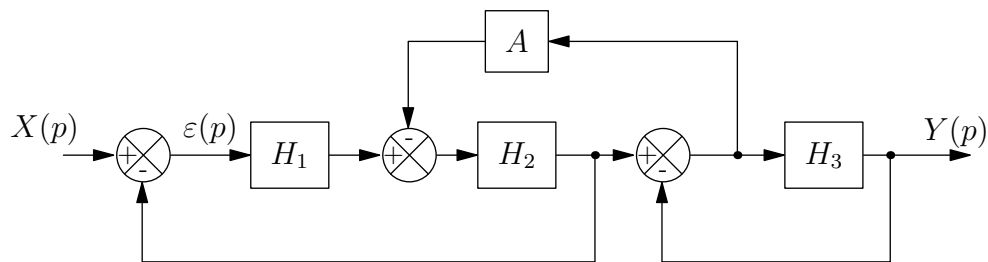


FIGURE 1 – Schéma-bloc à boucles imbriquées

SCL_24 Schéma-blocs avec une perturbation

[t1-8.4]

Soit un schéma-bloc modélisant un système avec une consigne $X(p)$, une sortie $Z(p)$ et une perturbation $Y(p)$. Il est décrit sur la figure 1.

exo-135-v1

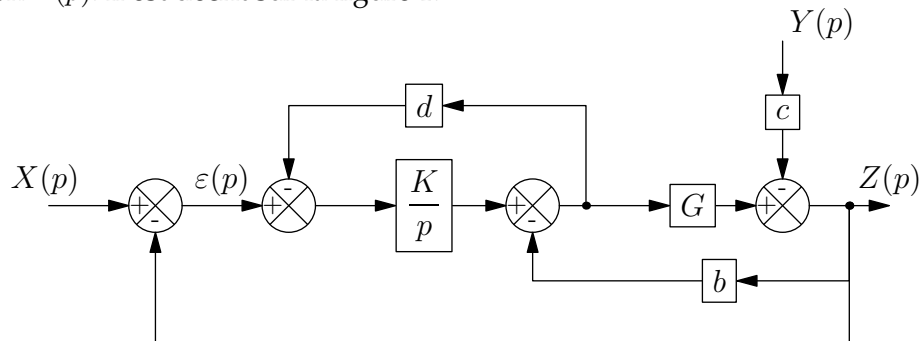


FIGURE 1 – Un schéma-bloc avec 2 entrées et 1 sortie

Q1 Réduire ce schéma-bloc.

Q2 Émettre un avis sur les deux fonctions de transfert mises en évidence

SCL_25 Un schéma-blocs complexe

[t1-8.5]

exo-102-v1

On considère le schéma-bloc de la figure 1. Il s'agit d'un système à deux entrées, $X(p)$ et $U(p)$, et à deux sorties, $Y(p)$ et $W(p)$.

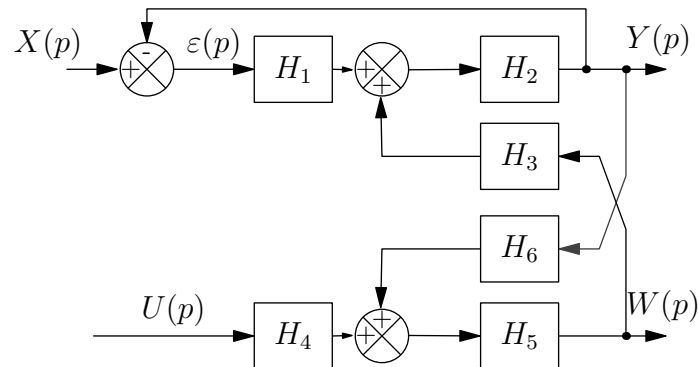


FIGURE 1 – Un schéma-bloc à 2 entrées et 2 sorties

- Q1** On s'intéresse à la seule influence de l'entrée $X(p)$ sur la sortie $Y(p)$. Déterminer la fonction de transfert :

$$H_x(p) = \left(\frac{Y(p)}{X(p)} \right)_{U(p)=0}$$

- Q2** On s'intéresse uniquement à la seule influence de l'entrée $U(p)$ sur la sortie $Y(p)$. Déterminer la fonction de transfert :

$$H_u(p) = \left(\frac{Y(p)}{U(p)} \right)_{X(p)=0}$$

- Q3** Quelle est l'influence simultanée des deux entrées $X(p)$ et $U(p)$ sur la sortie $Y(p)$?

SCL_31 Transformée de LAPLACE

[t1-8.6]

Soit à résoudre l'équation différentielle suivante

$$y''(t) + 10y'(t) + 21y(t) = 21x(t), \text{ avec } y(0) = y_0 \text{ et } y'(0) = y'_0$$

Q1 Exprimer cette équation dans le domaine symbolique, à écrire sous la forme

$$Y(p) = \frac{N(p)}{D(p)}X(p) + \frac{N_0(p)}{D(p)}$$

Que représentent les différents termes $\frac{N(p)}{D(p)}$, $\frac{N(p)}{D(p)}X(p)$ et $\frac{N_0(p)}{D(p)}$?

Q2 Soit une entrée en échelon unitaire. Déterminer les réponses temporelles $y(t)$ et donner l'allure de ces courbes dans les deux cas suivants :

- $y_0 = 0$ et $y'_0 = 0$
- $y_0 = 2$ et $y'_0 = 5$

Q3 On suppose les conditions initiales nulles et on prend comme entrée

$$x(t) = E \sin(\omega t)$$

On recherche alors une sortie sous la forme

$$y(t) = S \sin(\omega t + \varphi)$$

A quoi correspond cette sortie ?

En adoptant les notations complexes $x(t) = Ee^{j\omega t}$ et $y(t) = Se^{j(\omega t + \varphi)}$, déterminer à partir de l'équation différentielle le rapport $\frac{S}{E}e^{j\varphi}$, puis conclure.

exo-laplace-v1

SCL_32 Calcul de fonction de transfert

exo-calcul-FT-v1

On considère quatre systèmes d'entrée $e(t)$ et de sortie $s(t)$ décrits par les équations suivantes :

$$4\frac{d^3s(t)}{dt^3} + 2\frac{d^2s(t)}{dt^2} + 3\frac{ds(t)}{dt} + s(t) = 2e(t) \quad (1)$$

$$2\frac{d^2s(t)}{dt^2} + \frac{ds(t)}{dt} + s(t) = 4\frac{d^3e(t)}{dt^3} + 5\frac{de(t)}{dt} + e(t) \quad (2)$$

$$2\frac{ds(t)}{dt} + s(t) + 2\int_0^t s(x)dx = 3\frac{d^2e(t)}{dt^2} + \frac{de(t)}{dt} + 4e(t) \quad (3)$$

$$3\frac{ds^2(t)}{dt^2} + \frac{ds(t)}{dt} + s(t) + 2\int_0^t s(x)dx = \frac{d^2e(t)}{dt^2} + 2e(t) - e(t-2) \quad (4)$$

Q1 En considérant les conditions initiales nulles, calculer les quatre fonctions de transfert

$$H(p) = \frac{S(p)}{E(p)}$$

Q2 Pour une entrée en échelon d'amplitude e_0 et sans calculer $s(t)$, déterminer dans chacun des quatre cas les deux limites $\lim_{t \rightarrow \infty} s(t)$ et $\lim_{t \rightarrow 0^+} s(t)$.

Q3 Pour une entrée en rampe de pente a_0 et sans calculer $s(t)$, déterminer dans les chacun des quatre cas les deux limites $\lim_{t \rightarrow \infty} s(t)$ et $\lim_{t \rightarrow 0^+} s(t)$.

Q4 Sur ces quatre systèmes, lesquels peuvent être simulés avec SCILAB? Pourquoi?

SCL_33 Moteur à courant continu

[t1-8.7]

On cherche à établir un modèle dynamique d'une machine à courant continu à excitation indépendante et à flux constant.

exo-mcc-v1

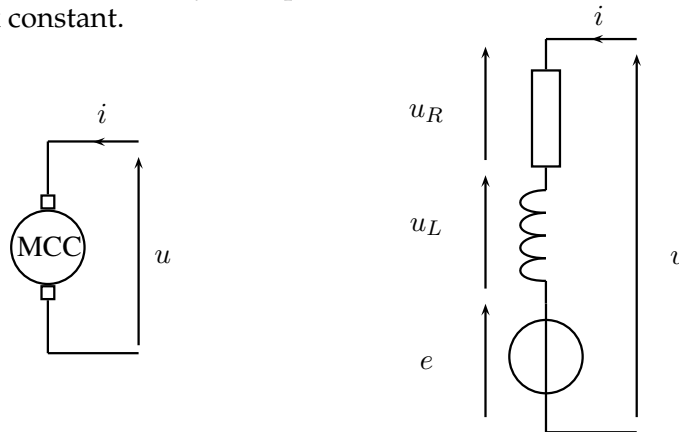


FIGURE 1 – Modèle électrique d'un MCC

Le fonctionnement d'un tel moteur est modélisé par le système d'équations suivant :

- Loi d'Ohm : $u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t)$
- Équation de couplage : $e(t) = K_v \omega(t)$
- Équation de couplage : $c_m(t) = K_c i(t)$
- Principe Fondamental de la Dynamique : $J \frac{d\omega(t)}{dt} = c_m(t) - c_r(t) - f\omega(t)$

avec :

- i : courant d'induit [A]
- u : tension aux bornes de l'induit [V]
- e : force contre électromotrice [V]
- c_m : couple moteur [Nm]
- ω : taux de rotation du moteur [rad/s]
- c_r : couple résistant (Nm)
- R : résistance totale : induit, balais, collecteur (Ω)
- L : inductance de l'induit [H]
- J : Moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation du rotor [kg m^2]
- K_v : constante de vitesse [V/(rad/s)]
- K_c : constante de couple [Nm/A]
- f : paramètre de frottement visqueux [Nm/(rad/s)]

- Q1** Exprimer le système d'équations du moteur à courant continu dans le domaine symbolique.
- Q2** Tracer le schéma-bloc d'un moteur à courant continu commandé en tension.
- Q3** Dédurre de ce schéma l'expression de $\Omega(p)$ en fonction de $U(p)$ et $C_r(p)$.
- Q4** Déterminer l'expression du taux de rotation en régime permanent si l'entrée de consigne est un échelon d'amplitude U_0 et si la perturbation est supposée nulle.

SCL_34 Machine de rééducation

[CCP-PSI-2013]

exo-reeducation-v1

Le principe de la rééducation est de solliciter les différents muscles de la jambe afin de récupérer un maximum de mobilité suite à un accident par exemple.

À partir de la mesure de l'action du patient et des paramètres du système, une consigne adéquate est générée pour piloter la machine. On s'intéresse au système asservi piloté par le générateur de consignes.



L'asservissement en déplacement longitudinal a pour consigne de déplacement x_c (en mètres), laquelle est converti en un nombre d'incréments de consigne n_c . Ce nombre d'incréments de consigne n_c est comparé à l'image n_θ du déplacement angulaire du moteur θ_m , obtenu avec un codeur incrémental, pour obtenir un écart noté ε . Cet écart est ensuite exploité par un correcteur pour générer la tension moteur u_m (en volts). Le moteur tourne ensuite à une vitesse ω_m (en radians par seconde), la position angulaire est notée θ_m (en radians).

Cette position angulaire est réduite à l'aide d'un réducteur et on note θ_s l'angle de l'axe de sortie du réducteur, qui est lié à un dispositif poulie-courroie de rayon ρ entraînant le support, dont on note le déplacement x .

Q1 Réaliser un schéma-bloc fonctionnel de cet asservissement, avec le nom des composants dans les blocs à la place des fonctions de transfert.

En vu de calculs de simulation afin d'optimiser l'efficacité de la machine, on a mené une étude mécanique qui conduit à l'équation suivante :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = C_m(t) - a F_r(t) \quad (1)$$

- J est le moment d'inertie équivalent (en kg m^2);
- $F_r(t)$ est l'effort résistant exercé par le patient (en N);
- a est une constante (en m).

La transmission est caractérisée par :

- $k_r = 0,05$ le rapport sortie/entrée du réducteur
- ρ est le rayon de la poulie, on a donc

$$x(t) = \rho \theta_s(t) \quad (2)$$

- le codeur incrémental propose $k_{inc} = 400$ incréments par tour

Les équations du moteur à courant continu, actionneur de cette chaîne fonctionnelle, sont

$$u_m(t) = e(t) + R i(t) \quad (3)$$

$$e(t) = k_e \quad (4)$$

$$c_m(t) = k_t i(t) \quad (5)$$

On note la transformée de Laplace d'une variable temporelle $f(t)$ par $F(p)$ et on se place dans les conditions de Heaviside : conditions initiales nulles.

Q2 Déterminer les constantes $K_1, K_2, K_5 \dots K_8$, ainsi que $H_3(p)$ et $H_4(p)$.

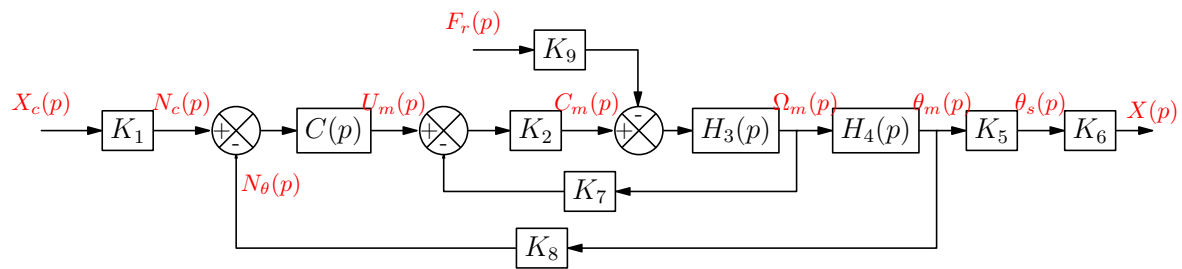


FIGURE 1 – Le schéma-bloc posant les différentes fonctions de transfert

SCL_51 Réponse d'un modèle du premier ordre

Soit un modèle du premier ordre mis sous sa forme canonique

$$F(p) = \frac{K}{1 + \tau p}$$

- Q1** Tracer la réponse indicielle de ce système.
- Q2** En déduire sa réponse à une rampe.
- Q3** Quelle est sa réponse à une impulsion ?

SCL_52 Réponse à une succession d'échelons

Soit un moteur électrique à courant continu dont la fonction de transfert simplifiée est

$$H_m(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)} = \frac{10}{2 + p} \quad (\text{vitesse angulaire en rad/s, tension en volts})$$

- Q1** Déterminer pour ce moteur le gain statique K_m , la constante de temps τ_m et le temps de réponse à 5% noté t_r .

On impose au moteur une tension qui est une succession d'échelons définie par

- $t < 0$ $u_m(t) = 0 \text{ V}$
- $t \in [0, 4 \text{ s}[$ $u_m(t) = 50 \text{ V}$
- $t \in [4 \text{ s}, 8 \text{ s}[$ $u_m(t) = 20 \text{ V}$
- $t \geq 8 \text{ s}$ $u_m(t) = 40 \text{ V}$

- Q2** En utilisant les caractéristiques graphiques de la réponse d'un modèle du premier ordre soumis à un échelon, tracer l'évolution de la courbe $\omega_m(t)$ en précisant les différents points caractéristiques.

SCL_53 Asservissement d'un petit moteur en vitesse

exo-01-vitesse

Soit un moteur électrique à courant continu ; il est alimenté par une tension $u_m(t)$ exprimée en volts et génère une vitesse angulaire $\omega_m(t)$ exprimée en radians par seconde. Sa fonction de transfert numérique est la suivante :

$$H_m(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)} = \frac{80}{4 + p}$$

Q1 Déterminer le gain statique K_m et la constante de temps τ_m de ce moteur.

On impose une entrée en échelon d'amplitude $u_0 = 5 \text{ V}$.

Q2 Tracer la courbe $\omega_m(t)$ et préciser le temps de réponse à 5%¹ du moteur noté t_{rm} en fonction de τ_m .

Si le moteur est soumis à un couple résistant variable, la vitesse de rotation va fluctuer. Pour minimiser les conséquences de ce problème, on réalise un asservissement en vitesse angulaire.

Pour cela, on monte le système en boucle fermée avec un capteur de vitesse angulaire² de gain K_c sur la boucle de retour. On installe un correcteur proportionnel K_p . Pour commander le fonctionnement du moteur, on installe un bloc adaptateur de gain constant A qui permet de transformer la vitesse angulaire consigne souhaitée par l'opérateur en une tension électrique.

Q3 Compléter le schéma-bloc correspondant, ébauché sur la figure 1.

Définir la valeur du gain de l'adaptateur à utiliser de manière à pouvoir comparer deux grandeurs « identiques ».

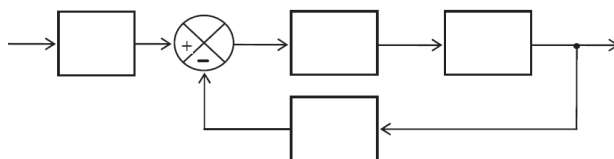


FIGURE 1 – Le schéma-bloc à compléter

Q4 Modifier le schéma précédent afin d'obtenir un schéma-bloc à retour unitaire.

Q5 Calculer la fonction de transfert en boucle fermée

$$H_f(p) = \frac{\Omega_m(p)}{\Omega_c(p)}$$

Préciser le gain statique K_f et la constante de temps τ_f en fonction de K_m , τ_m , K_c et K_p .

On choisit un capteur de gain $K_c = 0,05 \text{ V/(rad/s)}$. L'opérateur, par le biais de l'adaptateur, fait une entrée en échelon d'amplitude $\omega_c = 100 \text{ rad/s}$.

Q6 Tracer sur le graphe de la figure 2 les nouvelles courbes $\omega_m(t)$ pour $K_p = 1$ et $K_p = 3$. Préciser les deux temps de réponse à 5% que l'on notera t_{rf1} et t_{rf3} .

On s'intéresse pour conclure à l'évaluation des performances précédentes.

Q7 Comparer les différentes caractéristiques des courbes de réponse entre le montage sans asservissement (fonction de transfert $H_m(p)$) et le montage avec asservissement (fonction de transfert $H_f(p)$).

1. On rappelle que pour un modèle du premier ordre, le temps de réponse à 5% est la durée nécessaire pour que la sortie atteigne 95% de sa valeur finale.

2. Un capteur de vitesse angulaire mesurant la vitesse angulaire du moteur et la transformant en tension électrique

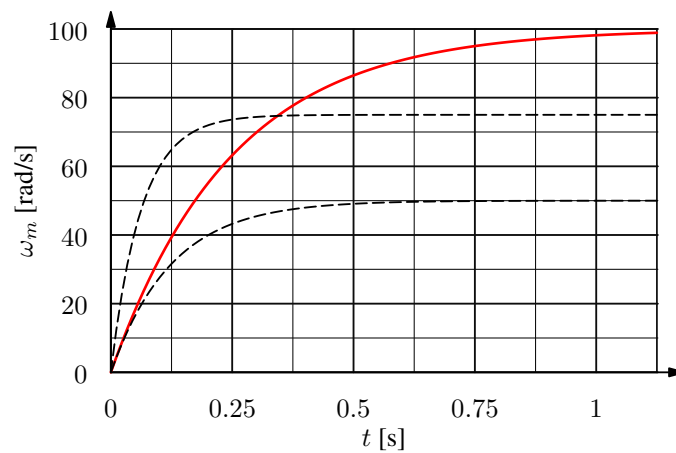


FIGURE 2 – Exemples de tracés qui peuvent éventuellement aider

SCL_54 Réponse d'un modèle du deuxième ordre

Soit un modèle du deuxième ordre mis sous sa forme canonique

$$F(p) = \frac{K}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0}p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$

Q1 Retrouver l'expression du premier dépassement en réponse indicielle

$$D\% = 100 \exp\left(\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)$$

Q2 Tracer en échelle log-log les valeurs des trois premiers dépassements en fonction du coefficient d'amortissement ξ .

On définit le décrétement logarithmique

$$\delta = \frac{2\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

Q3 Que représente-t-il ?

exo-reponse-temporelle-O2-v1

SCL_55 Asservissement d'un moteur en vitesse

exo-O2-vitesse

$$\frac{K}{1 + \frac{2m}{\omega_0}p + \frac{p^2}{\omega_0^2}} \quad K : \text{gain statique, } m : \text{coefficient d'amortissement; } \omega_0 : \text{pulsation propre}$$

Si $m \geq 1$ on peut utiliser la forme $\frac{K}{(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p)}$ avec τ_1 et τ_2 : constantes de temps

Soit un moteur électrique à courant continu dont la fonction de transfert non simplifiée est :

$$H_m(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)} = \frac{720}{(4 + p)(9 + p)} \quad (\text{vitesse angulaire en rad/s, tension en volts})$$

1) Déterminer le gain statique K_m , la pulsation propre ω_m et le coefficient d'amortissement m_m du moteur.

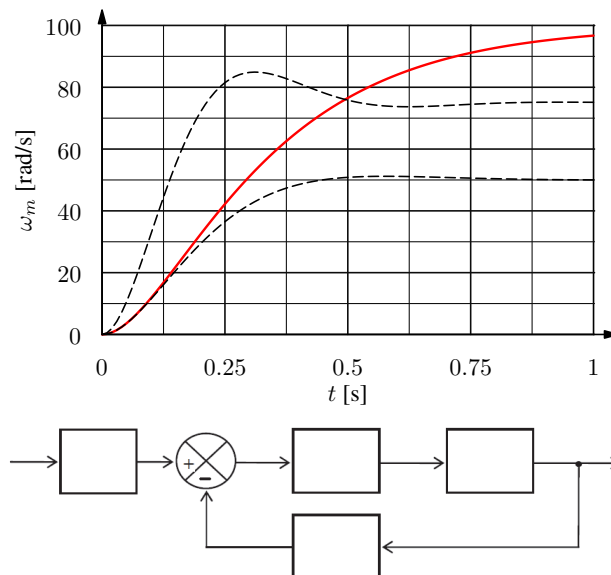
2) On impose une entrée en échelon d'amplitude $u_0 = 5$ volts.

Tracer, avec l'aide de la calculatrice, la courbe $\omega_m(t)$ et donner approximativement le temps de réponse à 5% du moteur noté t_{rm} .

3) Si le moteur est soumis à un couple résistant variable, la vitesse de rotation va fluctuer. Pour minimiser ce problème, on réalise un asservissement en vitesse angulaire.

On monte le système en boucle fermée avec un capteur de vitesse angulaire (mesurant la vitesse angulaire du moteur et la transformant en tension électrique) de gain K_C sur la boucle de retour.

On installe un correcteur proportionnel K_p . Pour commander le fonctionnement du moteur, on installe un bloc adaptateur de gain constant A qui permet de transformer la vitesse angulaire souhaitée par l'opérateur (consigne $\omega(t)$) en une tension électrique.



- Compléter le schéma bloc correspondant. Définir la valeur du gain de l'adaptateur à utiliser de manière à pouvoir comparer deux grandeurs "identiques".
- Modifier le schéma bloc pour obtenir un retour unitaire.
- Calculer la nouvelle fonction de transfert $H_f(p) = \frac{\Omega_m(p)}{\Omega_c(p)}$ en précisant le gain statique K_f de la boucle fermée, la pulsation propre ω_f et le coefficient d'amortissement m_f en fonction de K_m , τ_m , ω_m , m_m , K_c et K_p .
On prend un capteur de gain $K_c = 0,05 \text{ V}/(\text{rad/s})$. L'opérateur, par le biais de l'adaptateur, fait une entrée en échelon d'amplitude $\omega_c = 100 \text{ rad/s}$.
- Tracer sur le graphe ci-dessus les nouvelles courbes $\omega_m(t)$ pour $K_p = 1$ et $K_p = 3$; préciser les temps de réponse à 5% que l'on notera t_{rf1} et t_{rf3} .

4) Conclusions : comparer les différentes caractéristiques des courbes de réponse entre le montage sans asservissement (fonction de transfert $H_m(p)$) et le montage avec asservissement (fonction de transfert $H_f(p)$).

SCL_61 Lieux de transfert

exo-bode-black-v1

Q1 Tracer les diagrammes de BODE et de BLACK de la fonction de transfert

$$F(p) = \frac{K}{1 + \tau p}$$

Q2 Tracer les diagrammes de BODE et de BLACK de la fonction de transfert

$$F(p) = \frac{K}{p}$$

Q3 Tracer les diagrammes de BODE et de BLACK de la fonction de transfert

$$F(p) = \frac{K}{p(1 + \tau p)}$$

SCL_62 Tracé rapide d'un diagramme de BODE

Soit un système de fonction de transfert

$$F(p) = \frac{5}{p(1 + p)(1 + 0,125p)}$$

exo-trace-rapide-v1

Q1 En se servant du tableau suivant, tracer les diagrammes de BODE de $F(j\omega)$ **Q2** En déduire par lecture directe les marges de phase et de gain.**Tableau de référence**Soit $H(j\omega_r) = \frac{1}{1 + j\omega_r}$, avec $\omega_r = \frac{\omega}{\omega_0}$ la pulsation réduite

ω_r	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	1	2	4	8	16
GdB	0	0	0	-1	-3	-7	-12	-18	-24
$\varphi[^\circ]$	-3,5	-7	-14	-26,5	-45	-63,5	-76	-83	-86,5

TABLE 1 – Gain et phase pour un modèle d'ordre 1

SCL_63 Recherche de caractéristiques

Un servomécanisme inconnu est sollicité en régime permanent. Les courbes temporelles de l'entrée et de la sortie sont représentées sur la figure 1 ci-dessous.

exo-recherche-caracteristique-v2

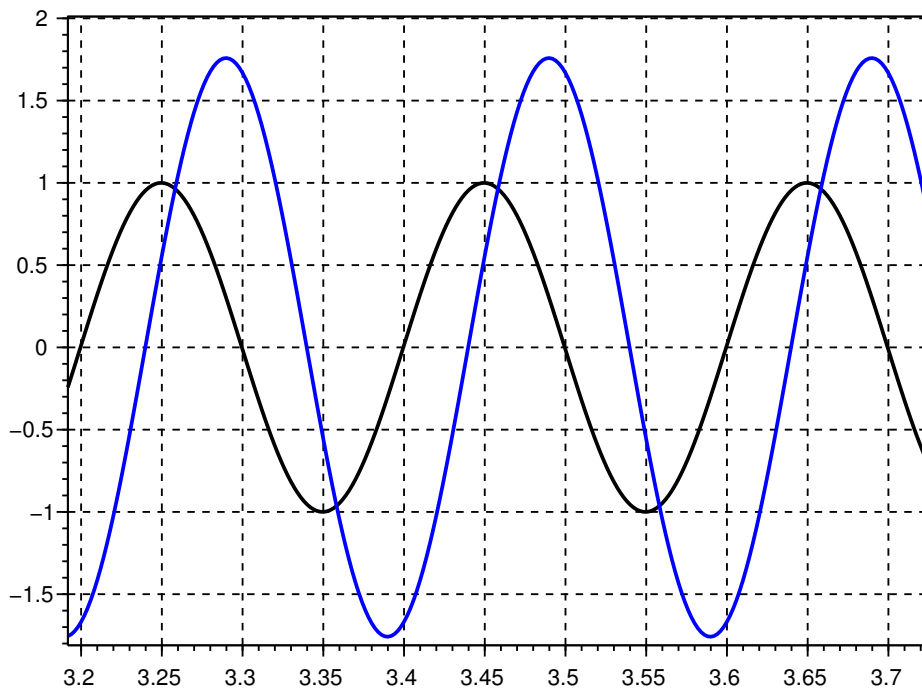


FIGURE 1 – Les courbes temporelles d'entrée et de sortie

On suppose le comportement du système assimilable à un premier ordre.

$$H(p) = \frac{K}{1 + \tau p}$$

- Q1** Sur la figure 1, déterminer la courbe image de l'entrée et la courbe image de la sortie.
- Q2** En exploitant les deux figures fournies, déterminer le gain statique et la constante de temps du système étudié.

Les diagrammes de BODE d'un modèle du premier ordre

On trace sur la figure 2 ci-dessous les diagrammes de BODE pour un modèle d'ordre 1 :

- la pulsation réduite $\omega_r = \frac{\omega}{\omega_0}$ est utilisée en abscisse ;
- le gain statique est considéré unitaire.

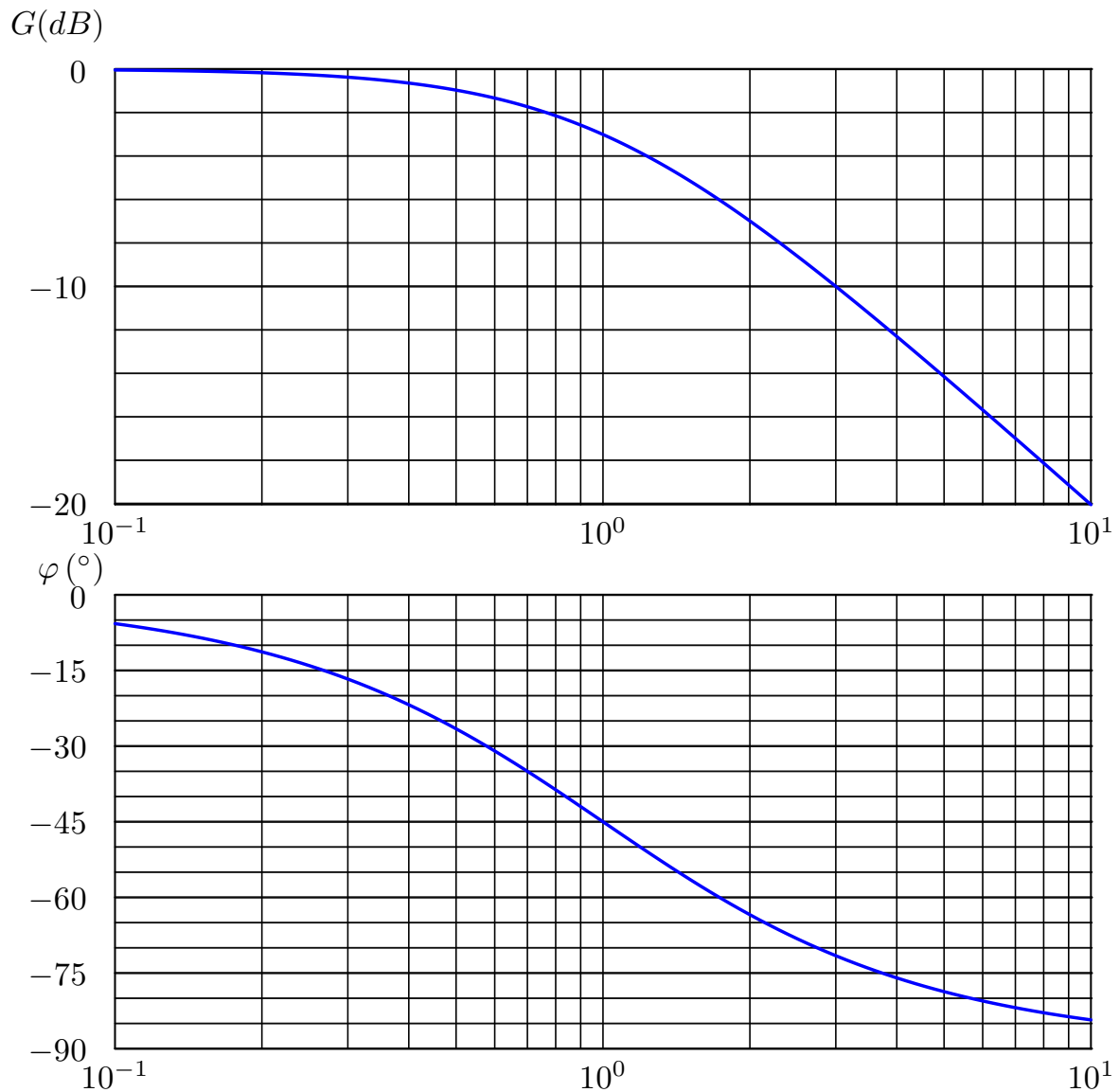


FIGURE 2 – Les diagrammes de BODE pour le modèle $H(j\omega_r) = \frac{1}{1+j\omega_r}$

SCL_64 Diagrammes de BODE

En utilisant les grilles de la figure 1 ci-dessous, tracer les diagrammes de BODE de la fonction de transfert

$$H(p) = \frac{17,8 p(1 + 3,476p + p^2)}{(1 + 0,01p)(1 + 10p)^3}$$

exo-tracer-bode-v1

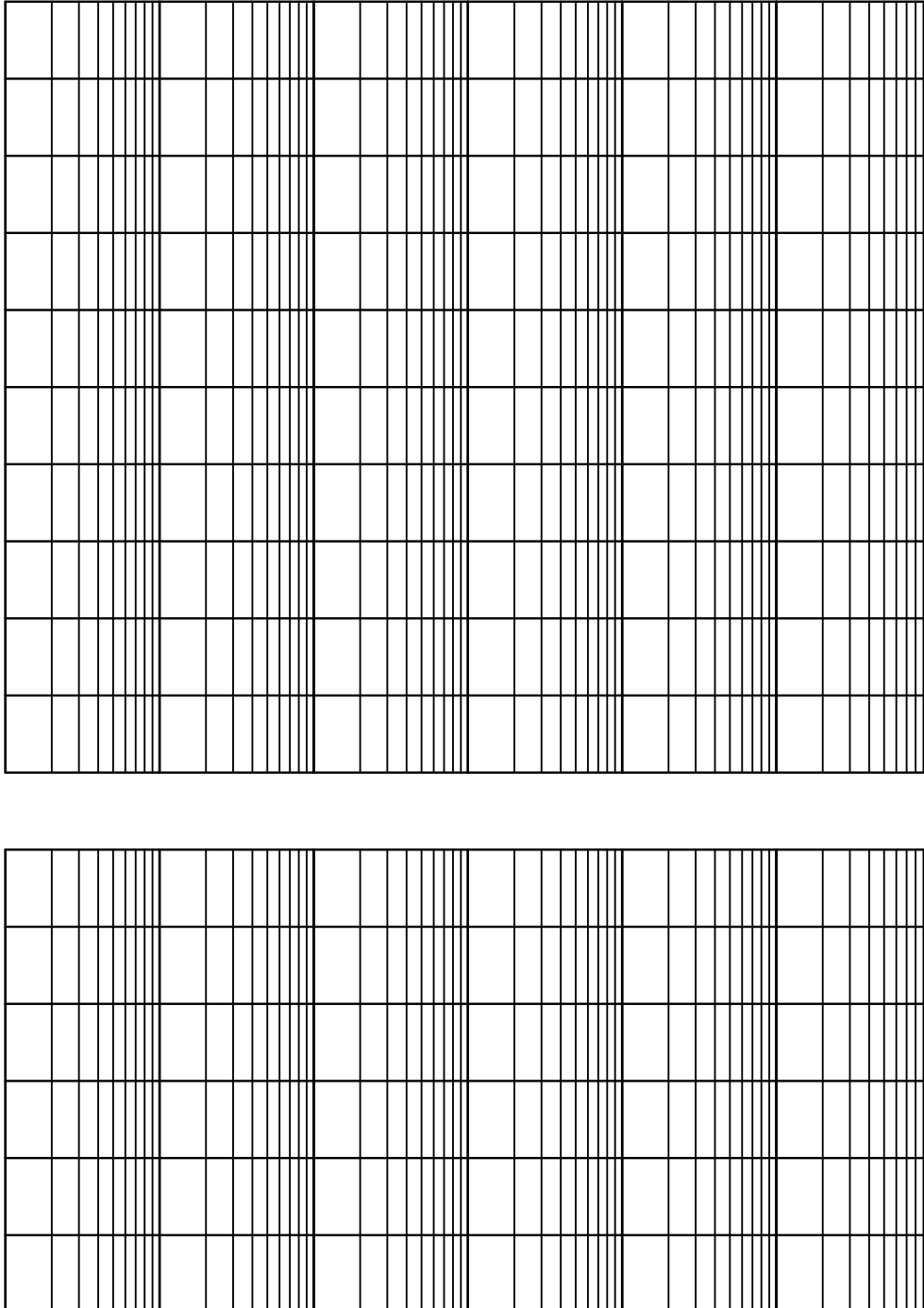


FIGURE 1 – Les grilles à compléter

SCL_71 Caractérisation d'un moteur de robot

On s'intéresse à un moteur à courant continu.

Essai statique du moteur

Une série de mesures a été effectuée en régime permanent sur ce moteur. Les valeurs relevées sont données dans le tableau suivant

Tension d'alimentation	[V]	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Fréquence de rotation	[tr/mn]	0	0	198	595	1000	1410	1600	1800	1910

- Q1** Tracer la caractéristique statique N en fonction de U .
- Q2** On considère les deux points de repos M_0 (3,5 V – 800 tr/mn) et M_1 (6 V – 1600 tr/mn). Déterminer le gain statique en chaque point, en (tr/mn)/V, puis en (rad/s)/V.
- Q3** Quelle plage de linéarité peut-on prendre autour de M_0 ?
On donnera les valeurs limites de U (appelées limites de la zone de proportionnalité) et les valeurs correspondantes de N .
- Q4** Quelle erreur maximum commet-on sur N , si on admet la même zone de proportionnalité autour de M_1 ?

Essai dynamique du moteur

Ce moteur est alimenté sous 3,5 V depuis un long moment. On augmente brusquement la tension jusqu'à 5 V.

- Q5** Quelle variation de vitesse va-t-on constater ?

On suppose que le moteur a, autour de son point de repos, le comportement d'un système linéaire du premier ordre, de constante de temps $t = 0,3$ s.

- Q6** Modéliser la variation causale de la tension d'alimentation, et calculer la réponse temporelle du moteur en fréquence de rotation.
- Q7** En combien de temps la vitesse du moteur sera-t-elle stabilisée à 95% de sa valeur de régime permanent ?

SCL_81 Réponse temporelle d'un thermomètre

[Colombari]

Un thermomètre initialement dans une enceinte à 20°C est plongé dans un milieu à une température connue de 8°C afin d'évaluer ses performances.

exo-thermomètre-v1

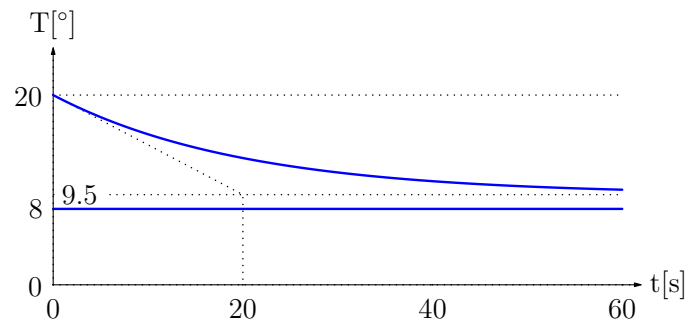


FIGURE 1 – Réponse du thermomètre

La courbe de la figure 1 montre l'allure de l'évolution de la température lue sur le thermomètre.

- Q1** Évaluer les précisions absolue et relative de cette réponse.
- Q2** Par quel type de fonction de transfert peut modéliser le comportement de ce thermomètre ?
- Q3** Déterminer alors les caractéristiques de ce système.
- Q4** Évaluer la rapidité de ce capteur par son temps de réponse à 5%.
- Q5** Écrire l'équation temporelle de la température affichée sur le thermomètre.

SCL_82 Réponse temporelle d'un thermocouple

La figure 1 ci-dessous a été obtenue avec le logiciel d'acquisition PHYSCOPE le 24 janvier 1997 à l'occasion de la première année des TIPE sur le thème « La mesure »

exo-thermocouple-v1

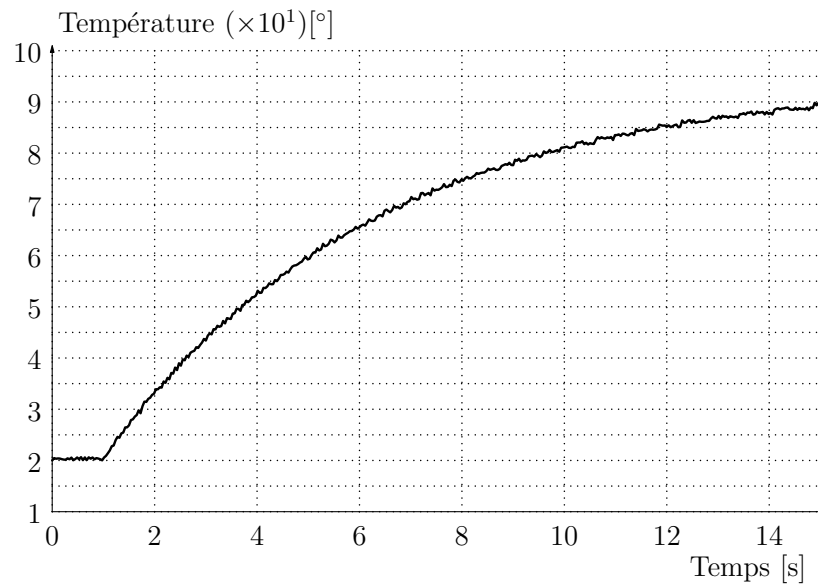


FIGURE 1 – Réponse d'un thermocouple à un échelon de température

- Q1 Proposer un protocole d'expérimentation.
- Q2 Proposer un modèle de comportement et déterminer ses caractéristiques.
- Q3 Quelle est la température du bain ayant servi à l'essai ?

SCL_83 Réponse temporelle d'un actionneur

On réalise un essai sur un actionneur : à l'instant $t = 0$, on applique en entrée un échelon de tension $u(t)$ d'amplitude 3 V et on obtient la courbe de réponse suivante avec la sortie $f(t)$ exprimée en newton.

exo-actionneur-identification-v1

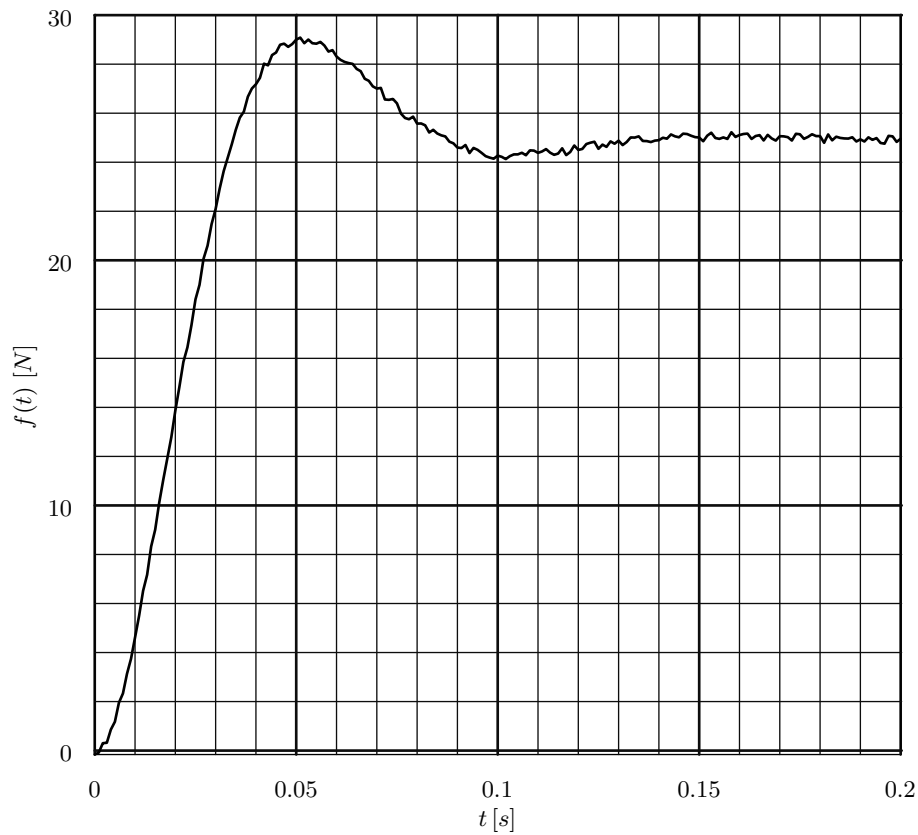


FIGURE 1 – Réponse de l'actionneur étudié à un échelon

- Q1** Modéliser cet actionneur sous forme de schéma-bloc.
- Q2** Proposer une fonction de transfert qui permette de représenter le comportement de ce système.

Valeurs relatives des dépassements pour un modèle d'ordre 2

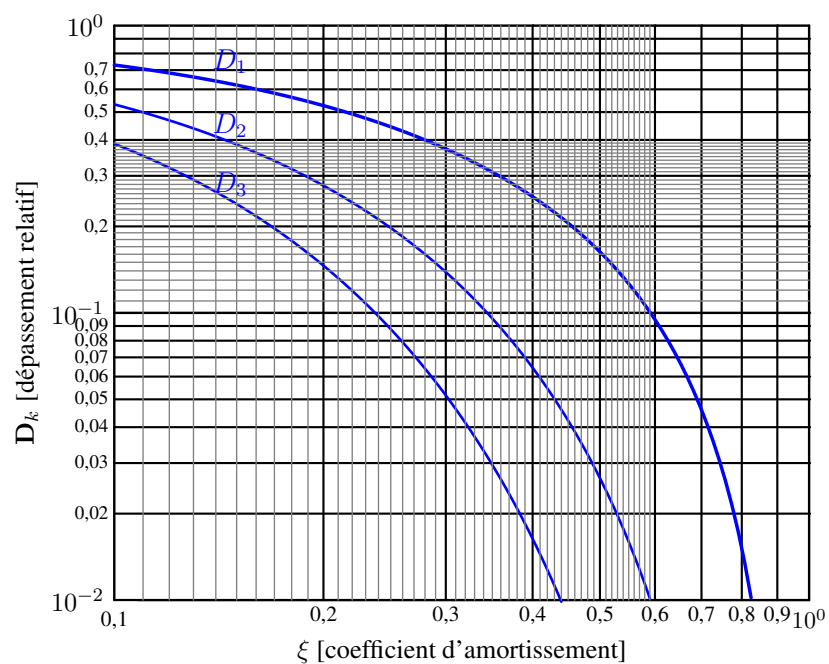


FIGURE 2 – Les valeurs des premiers dépassements pour un modèle du deuxième ordre

Temps de réponse à 5% d'un modèle d'ordre 2

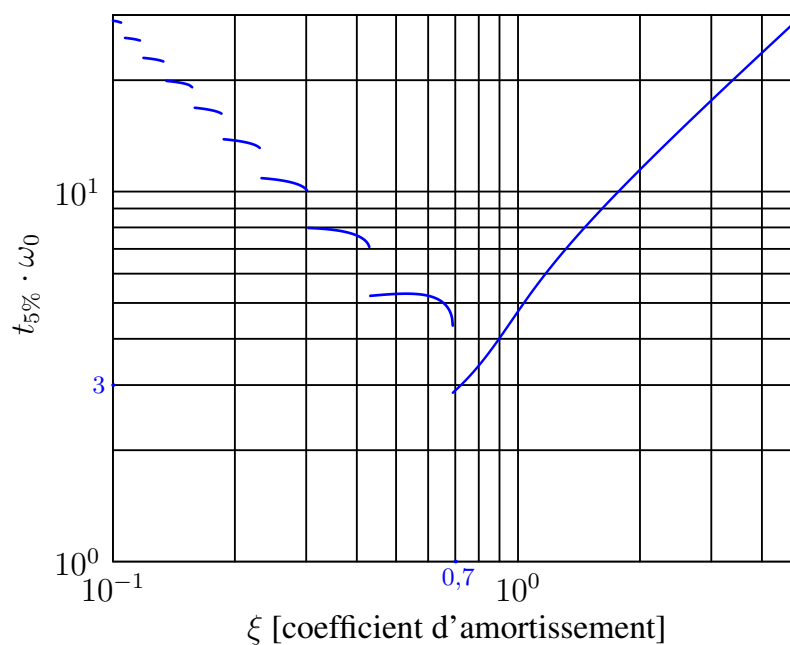


FIGURE 3 – Temps de réponse réduit pour un modèle du deuxième ordre

SCL_84 Sollicitation d'un vérin hydraulique

Un vérin hydraulique permet d'obtenir un mouvement de translation à partir d'un débit d'huile imposé.

On donne sur la figure 1 la courbe de vitesse de translation de la tige du vérin par rapport à son corps, en cm/s , pour une entrée en échelon de débit de $501/\text{min}$.

Proposer une forme de fonction de transfert pour le vérin et en déterminer les caractéristiques.

exo-identification-1

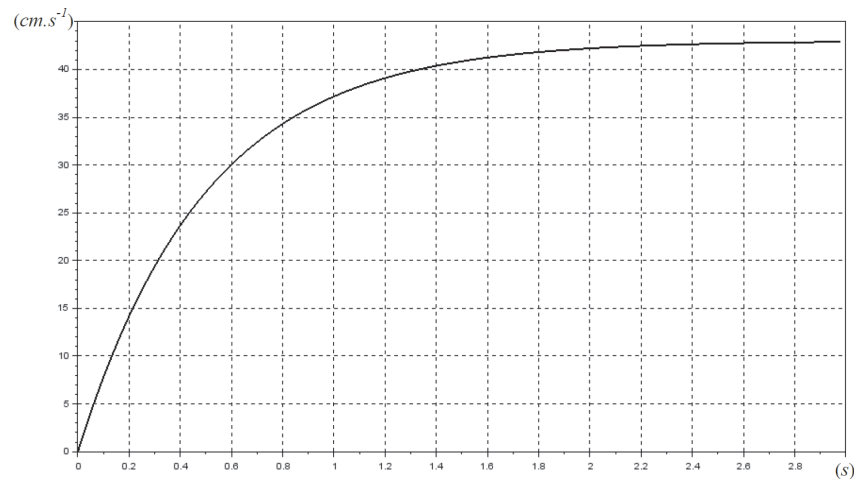


FIGURE 1 – Réponse en vitesse du vérin

SCL_85 Trois thermocouples différents

Un thermocouple permet de mesurer la température en donnant une information électrique en volt. Afin de déterminer les caractéristiques du thermocouple, on fait une mesure avec le protocole suivant, le thermocouple étant à température ambiante, à savoir 20°C , on le trempe brusquement dans un liquide à 70°C et on récupère l'information électrique en millivolts.

Voici figure 2 trois courbes de mesure obtenues avec trois thermocouples différents.

Proposer une forme de fonction de transfert pour chaque thermocouple et en déterminer les caractéristiques.

exo-identification-2

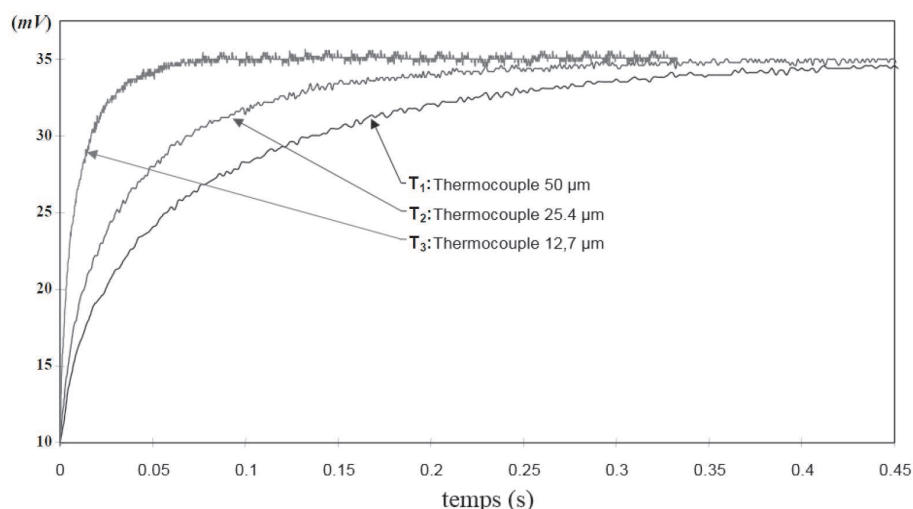


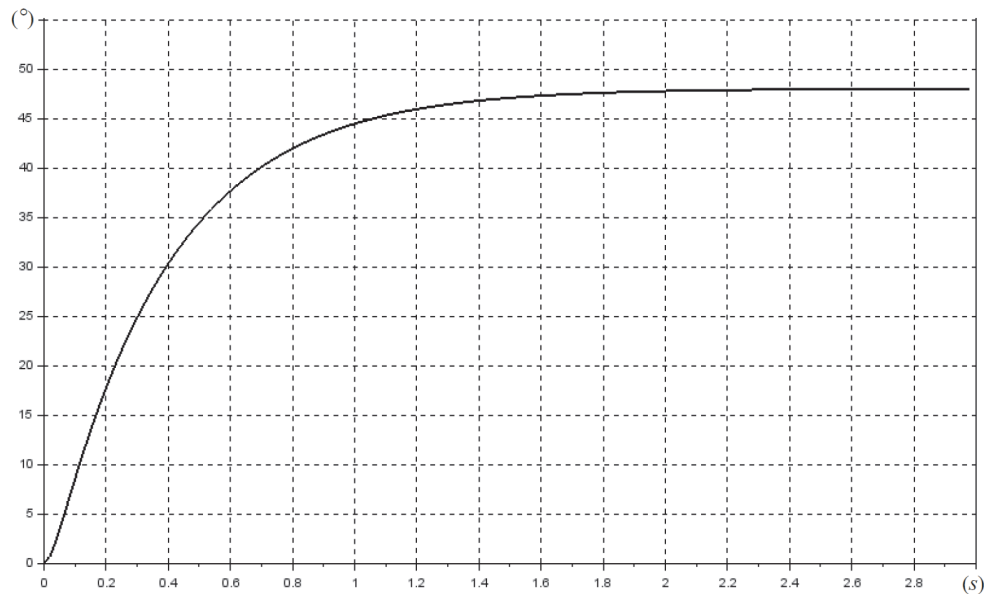
FIGURE 2 – Les réponses de trois thermocouples

SCL_86 Position angulaire d'un bras de robot

exo-identification-3

On donne la courbe de mesure de position angulaire d'un bras de robot asservi en position soumis à un échelon de position de 50° .

Proposer une forme de fonction de transfert pour cet asservissement et en déterminer les caractéristiques.

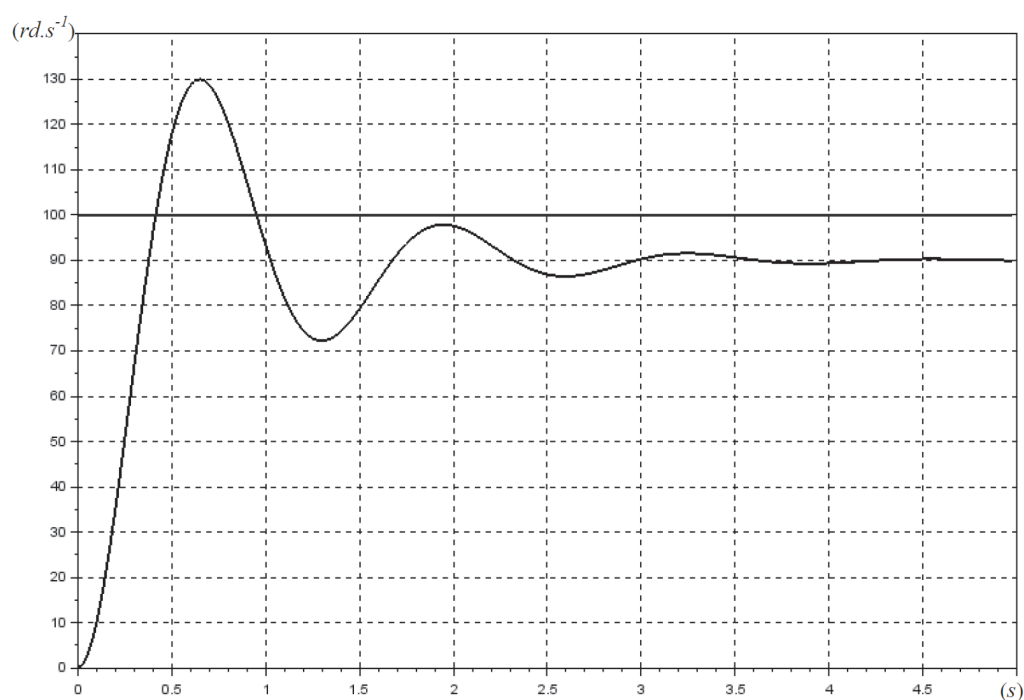


SCL_87 Un moteur asservi en vitesse

exo-identification-4

On donne la courbe de mesure de vitesse d'un moteur asservi en vitesse soumis à un échelon de vitesse de 100 rad/s .

Proposer une forme de fonction de transfert pour cet asservissement et en déterminer les caractéristiques.



SCL_88 Identification à partir de caractéristiques fréquentielles

exo-identification-frequentielle-v1

Les caractéristiques fréquentielles d'un système permettent également d'en identifier la fonction de transfert. Considérons par exemple le diagramme de BODE de la figure ci-dessous. La courbe expérimentale est déterminée en appliquant un signal sinusoïdal à l'entrée du système et en mesurant pour chaque pulsation l'amplitude et le déphasage de la sortie.

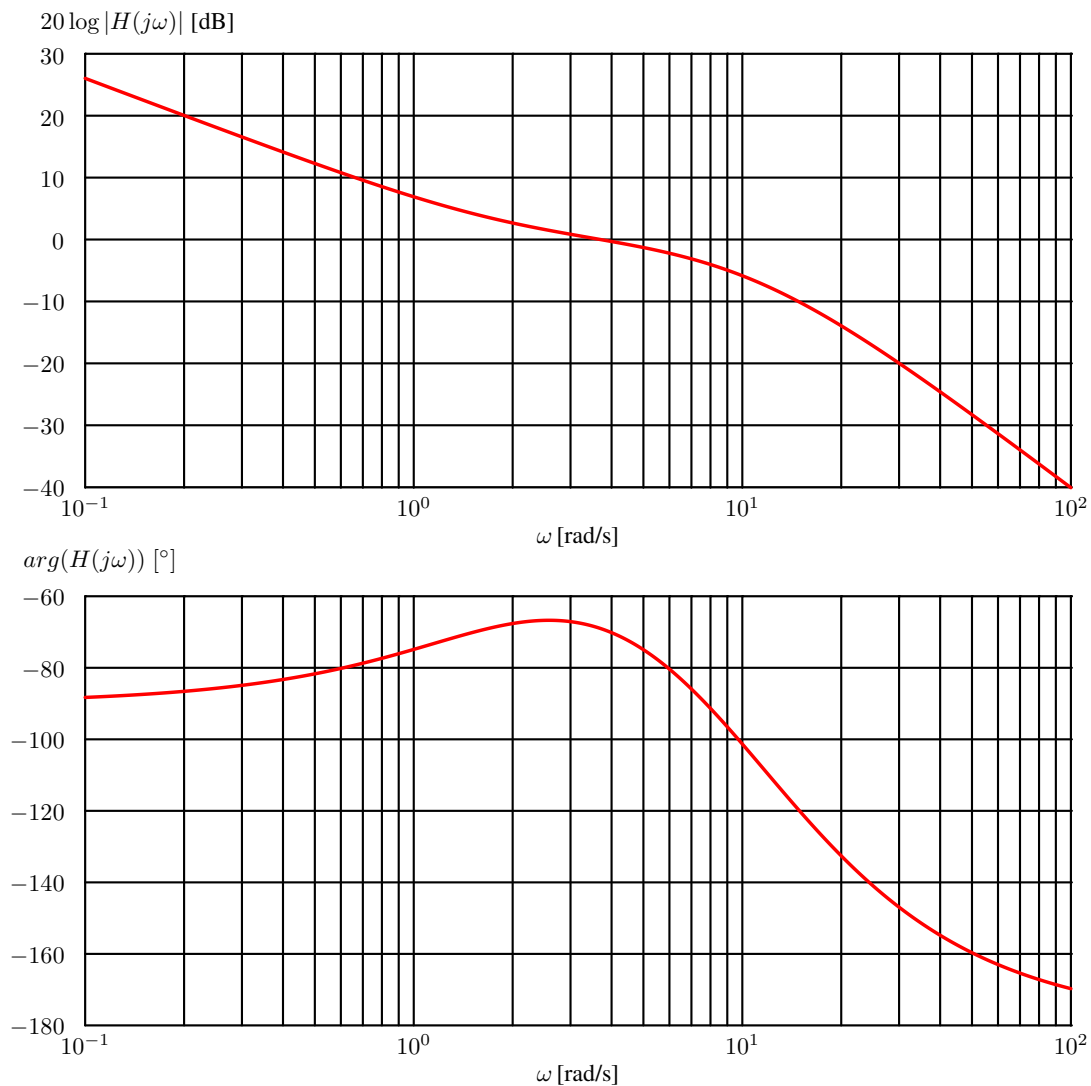


FIGURE 1 – Les diagrammes de BODE expérimentaux

- Q1** Proposer une fonction de transfert pour ce système.
- Q2** Superposer au tracé fourni les diagrammes asymptotiques correspondants.

SCL_91 Comparaison « boucle ouverte - boucle fermée »

exo-bo-bf-v1

On s'intéresse dans cet exercice à la génération de la commande en boucle fermée. Pour cela, on considère un « système commandé » de fonction de transfert

$$F(p) = \frac{1}{1 + \tau p}$$

- Q1** Déterminer puis tracer la réponse indicielle de ce système, en utilisant des graduations en τ pour le temps, de 0 à 4τ .

Il est demandé de prévoir au moins 3 unités disponibles en ordonnée.

Ce système est maintenant asservi, et le schéma bloc correspondant est tracé ci-dessous. Le correcteur choisi est un amplificateur de gain K .

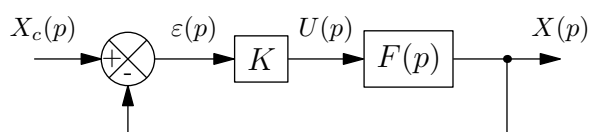


FIGURE 1 – Schéma-bloc du système asservi

- Q2** Que représentent les rapports $\frac{X(p)}{\varepsilon(p)}$ et $\frac{X(p)}{X_c(p)}$?

Les calculer.

Pour la suite du problème, le gain K est pris égal à 3.

- Q3** Tracer sur le graphe précédent la réponse indicielle de ce système asservi.
- Q4** Toujours concernant la réponse indicielle de ce système asservi, déterminer puis superposer aux courbes précédentes la loi de commande $u(t)$.
- Q5** Déterminer puis superposer aux courbes précédentes la réponse du système commandé à un échelon d'amplitude K .
- Q6** Comparer les pentes à l'origine des deux dernières courbes tracées et expliquer pourquoi le système asservi atteint plus rapidement le régime permanent de la réponse.

Transformées de LAPLACE

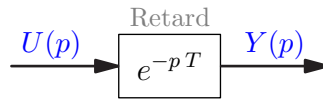
Pour les calculs, on donne la transformée de LAPLACE suivante

$t \longmapsto f(t)$	$p \longmapsto F(p)$
$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!} e^{at}$	$\frac{1}{(p-a)^n}$

SCL_92 Approche graphique de la stabilité

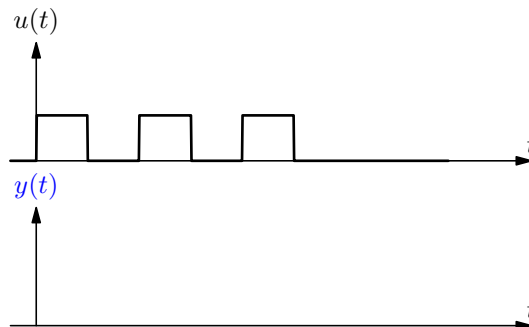
[t2-4.7]

On se propose dans cet exercice d'illustrer la proposition « asservir peut rendre instable ». On considère pour cela le système à retard pur décrit par le schéma-bloc suivant



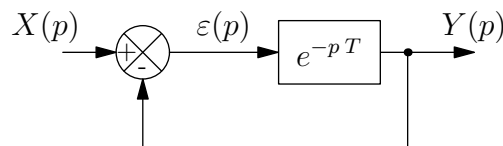
On le sollicite par une entrée $u(t)$ constituée d'une succession de créneaux d'amplitude unitaire, de durée T et espacés de la même durée T .

Q1 Tracer la courbe temporelle de la réponse $y(t)$ pour un signal de commande à trois créneaux.



Q2 Ce système est-il stable au sens « entrée bornée, sortie bornée » ?

On boucle ce système sur lui-même, sans aucune correction. La commande du système précédent est maintenant directement l'écart entre la consigne $X(p)$ et la sortie $Y(p)$.

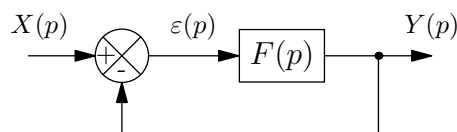


Q3 Construire les courbes temporelles représentant l'écart $\varepsilon(t)$ et la sortie $y(t)$ pour une consigne à deux créneaux.



Q4 Ce système est-il stable au sens EBSB ?

On généralise le raisonnement à un système asservi décrit par un schéma-bloc à retour unitaire et de fonction de transfert en boucle ouverte $F(p)$



Q5 À quelle condition sur la FTBO $F(p)$ un tel système peut-il admettre une sortie $y(t)$ non nulle pour une entrée $x(t)$ nulle ?

Q6 Le système à retard pur étudié et la sollicitation choisie satisfont-ils à cette condition ?

SCL_93 Nacelle « H21-TX »

exo-nacelle-v2

Asservissement angulaire du panier

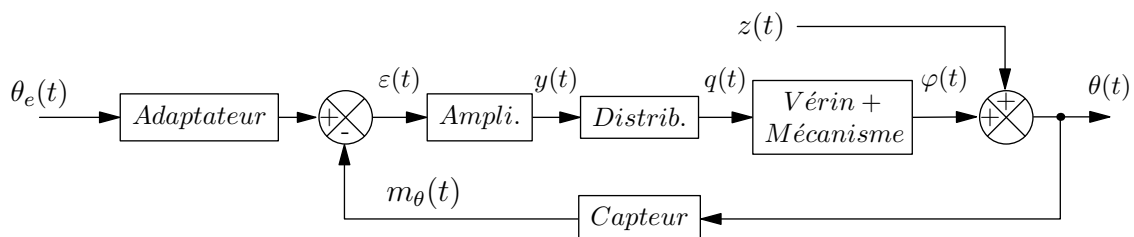
L'étude proposée porte sur une nacelle à flèche télescopique, telle que photographiée ci-contre. Ce système est autopropulsé et permet à un opérateur placé dans le panier de commander non seulement la hauteur, le pivotement, mais également de piloter la translation de la nacelle pour atteindre les zones de travail.

L'énergie nécessaire est fournie principalement par un moteur thermique qui entraîne un groupe hydraulique. Une pompe électrique de secours est également disponible en cas d'incident. Les différents actionneurs utilisés sont hydrauliques avec commande proportionnelle. Pour maintenir le panier horizontal, on utilise comme actionneur un vérin hydraulique. Sa commande est asservie. Ceci permet le maintien horizontal du panier lors du relevage mais également si la nacelle se déplace sur un sol un peu accidenté. Lors du transport de la nacelle sur une plate-forme, on peut incliner le panier pour réduire l'encombrement. Pour effectuer certains travaux, l'opérateur peut souhaiter incliner le panier.



Le système comprend :

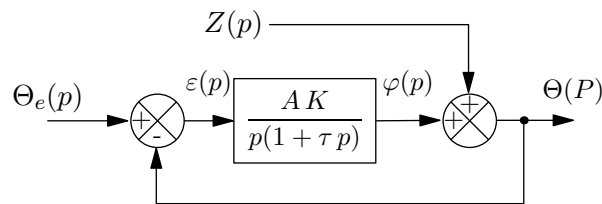
- un distributeur proportionnel qui sous l'effet de la tension de commande $y(t)$ délivre un débit $q(t)$ de fluide hydraulique avec une modélisation d'un premier ordre de gain statique K_1 et de constante de temps T_1 . Pour les applications numériques on a : $K_1 = 200 \text{ cm}^3/\text{s/V}$ et $T_1 = 0,02 \text{ s}$.
- un vérin associé à un mécanisme qui lie le débit $q(t)$ de fluide hydraulique et la vitesse rotation $\omega(t)$ de la nacelle par l'équation : $\omega(t) = a * q(t)$ avec $a = 0,0025^\circ/\text{cm}^3$ (On conservera les unités données car elles sont cohérentes); la rotation de la nacelle associée est $\varphi(t)$ telle que $\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}$.
- Un capteur d'inclinaison installé dans le panier. Il mesure l'inclinaison $\theta(t)$ du panier par rapport à l'horizontale, tel un niveau à bulle. Cette inclinaison résulte de la rotation $\varphi(t)$ du panier par rapport au châssis et de la rotation $\alpha(t)$ du châssis par rapport au sol qui constitue une perturbation. On a : $m_\theta(t) = c\theta(t)$ avec $c = 0,2 \text{ V}^\circ$.
- Un régulateur qui comprend un comparateur et un amplificateur de gain statique A qui délivre la commande du distributeur.
- Un adaptateur permet de convertir l'entrée $\theta_e(t)$ en consigne $u_e(t)$ avec $u_\theta(t) = c\theta_e(t)$.



- [Q1] Quelle est la fonction de transfert $H_1(p) = \frac{Q(p)}{U(p)}$ associée au distributeur ?
- [Q2] Quelle est la fonction de transfert $H_2(p) = \frac{\varphi(p)}{Q(p)}$ associée à l'ensemble vérin-mécanisme ?
- [Q3] À partir du schéma-bloc de l'énoncé, construire un schéma-bloc à retour unitaire de l'asservissement en remplaçant les noms des boîtes par leurs fonctions de transfert.
- [Q4] Donner l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte $FTBO(p)$.

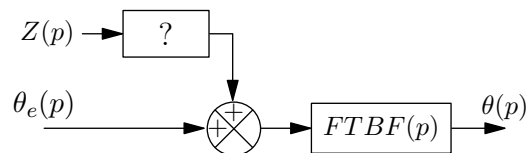
La suite du problème peut être considérée comme un nouveau problème; Tout résultat ou notation précédent est sans objet.

On considère l'asservissement de position angulaire décrit par le schéma-bloc ci-dessous et dans lequel $Z(p)$ représente une perturbation :



Pour les applications numériques : A est une constante *a priori* inconnue et sans dimension, $K = 10$ [SI], $\tau = 0,05$ s.

- Q5** Mettre le schéma-bloc sous la forme suivante, en détaillant les fonctions de transfert sous leur forme canonique



- Q6** En prenant $A = 10$ et en l'absence de perturbation, tracer l'allure de la réponse à un échelon de 10° en précisant les points caractéristiques de la réponse. Déterminer le temps de réponse à 5%.
- Q7** On considère toujours une entrée en échelon d'amplitude 10° . Proposer une valeur de A qui permette d'obtenir le plus petit temps de réponse à 5% si on tolère un dépassement. que vaut alors ce temps de réponse.
- Q8** En supposant la consigne nulle, déterminer l'influence à long terme d'une perturbation constante de 5° .

La suite du problème peut être considérée comme un nouveau problème. Tout résultat ou notation précédent est sans objet.

Pour étudier plus précisément l'asservissement un diagramme de Bode de la Fonction de Transfert en Boucle Ouverte notée $FTBO_1(p)$ a été tracé et figure sur le document-réponse avec :

$$FTBO_1(p) = \frac{50}{p(1 + 0,05p)}$$

Il s'avère que le comportement du capteur d'inclinaison ne peut pas être modélisé par un gain pur, mais comme un système d'ordre 1. La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte à considérer est :

$$FTBO_2(p) = FTBO_1(p) \cdot \frac{1}{(1 + 0,8p)}$$

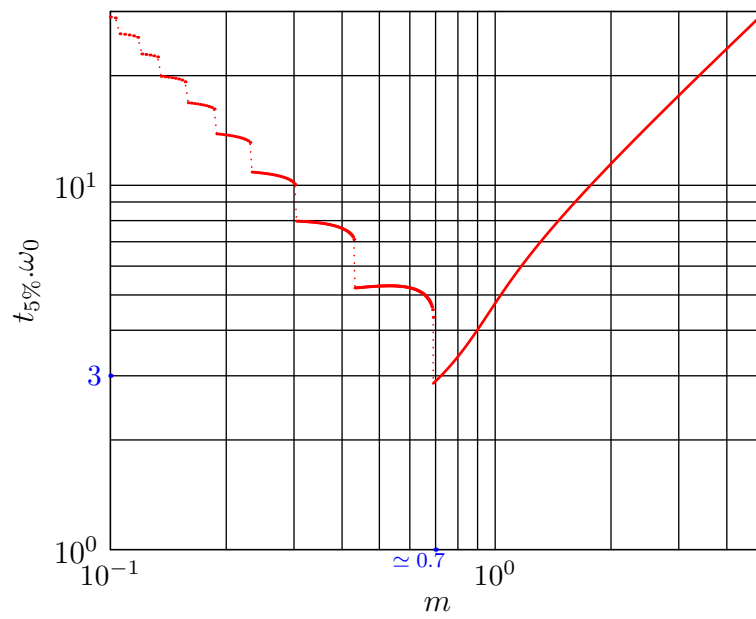
- Q9** Tracer sur le document-réponse les diagrammes asymptotiques du gain et de la phase de $FTBO_2(p)$ en utilisant le tracé relatif à $FTBO_1(p)$.
- Q10** Déterminer graphiquement la pulsation ω_{0dB} pour laquelle $G_2(\omega_{0dB} = 0)$. Calculer la phase correspondante $\varphi(\omega_{0dB})$.

———— FIN ————

Nacelle « H21-TX »

- DOCUMENT RÉPONSE -

R6



R9

R10

