

## DS 2

**Automate d'exploration de l'hémostase  
Chargement et déchargement des cargos porte-  
conteneurs**

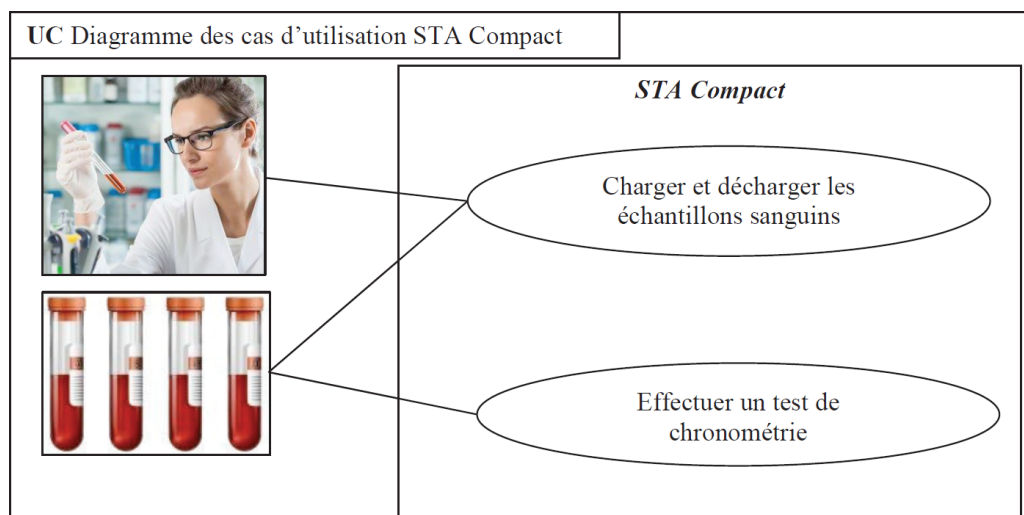
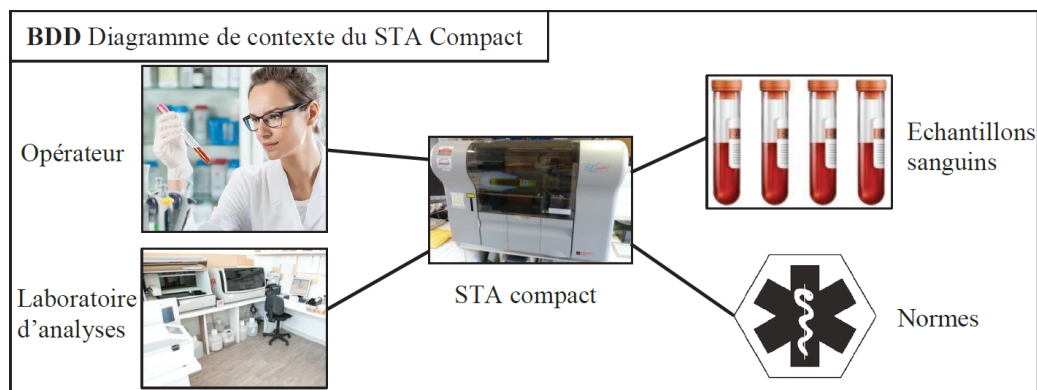
CCP MP 2015 – Centrale Supélec 2013

**1 Automate d'exploration de l'hémostase****1.1 Présentation du système**

La société Stago est un laboratoire pharmaceutique de l'industrie du Diagnostic In Vitro (DIV) entièrement dédiée à l'exploration de l'hémostase et de la thrombose. L'hémostase est le processus physiologique qui permet d'interrompre le saignement pour éviter l'hémorragie. L'objet de cette étude, le STA Compact, est un automate de laboratoire destiné à l'analyse de l'hémostase.



Les figures suivantes situent le STA Compact dans son environnement et précisent ses fonctions.



Le STA Compact permet de réaliser, entre autre, des tests de chronométrie afin de mesurer un temps de coagulation.

Le principe du test de chronométrie est le suivant :

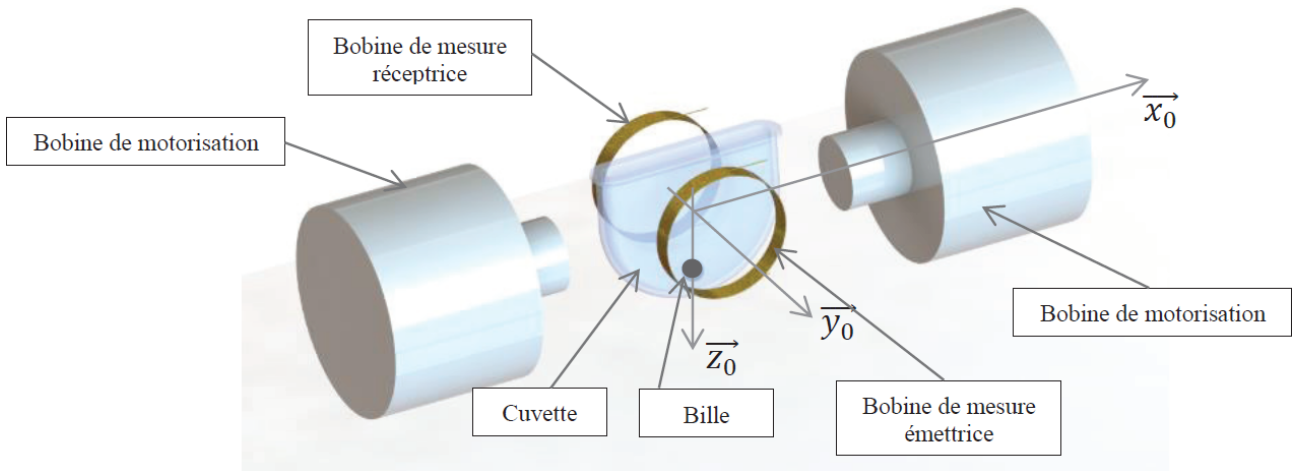
- une dose de réactif est mélangée à une dose de plasma sanguin précédemment étuvée dans une cuvette contenant une bille;
- l'ensemble est chauffé alors que la bille est mise en oscillation dans le mélange par un champ magnétique;
- on mesure l'amplitude de l'oscillation qui diminue sensiblement lors d'une variation de viscosité du mélange sang-réactif;
- le temps écoulé jusqu'à la diminution des oscillations donne le temps de coagulation.

## 1.2 Analyse de l'exigence 3.3 « Mettre la bille en oscillation »

**Objectif** Déterminer la pulsation optimale des bobines motrices.

### 1.2.1 Mise en situation

Le principe de la chronométrie consiste à mesurer la variation de l'amplitude d'oscillation d'une bille placée dans la cuvette de mesure.



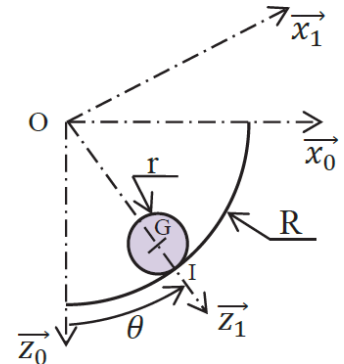
La bille, roulant sans glisser sur le fond cylindrique de la cuvette, est mise en mouvement par un champ magnétique variable induit par deux bobines motrices placées de part et d'autre de la tête de mesure.

L'amplitude des oscillations est mesurée par deux autres bobines, l'une émettrice, l'autre réceptrice. Après amplification du signal mesuré, on obtient un signal quasi-sinusoïdal, reflet de l'oscillation de la bille. À viscosité constante, on obtient un balancement pendulaire constant de la bille. Quand la viscosité augmente (phénomène de coagulation), l'amplitude d'oscillation de la bille varie. Pour chaque mesure, le champ magnétique est ajusté en fonction de la viscosité initiale du milieu et du type de test.

La bille est de masse  $m$ , de centre de masse  $G$ , de rayon  $r$  et roule sans glisser sur un rail circulaire de rayon  $R$  dans le plan  $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$ . La position de la bille sur le rail est repérée par :  $\theta = (\vec{z}_0, \vec{z}_1) = (\vec{x}_0, \vec{x}_1)$ .

$f$  est le coefficient d'adhérence au contact bille/cuvette :  $f = 0, 1$ .  $J = \frac{2}{5} m r^2$  le moment d'inertie de la bille autour de l'axe  $(G, \vec{y}_0)$ .

L'équation du mouvement de la bille est donnée par :  $\frac{7}{5} m (R - r) \ddot{\theta} + f_v (R - r) \dot{\theta} + mg \sin \theta = F(t) \cos \theta$ .



### 1.2.2 Modélisation du mouvement de la bille

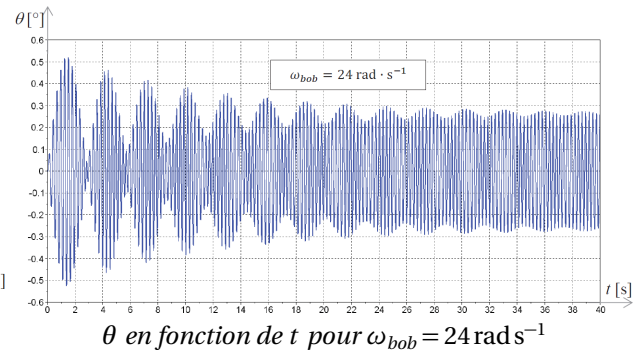
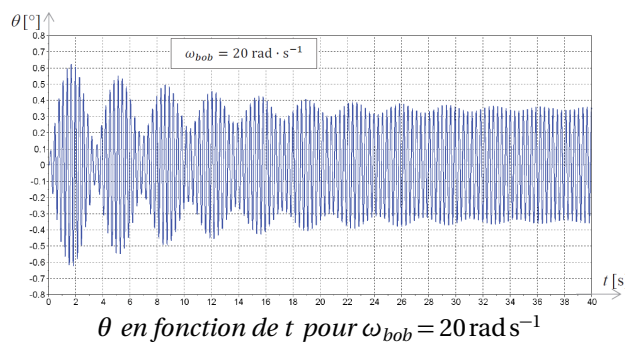
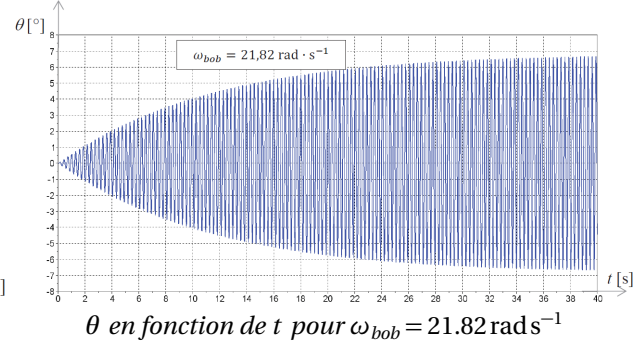
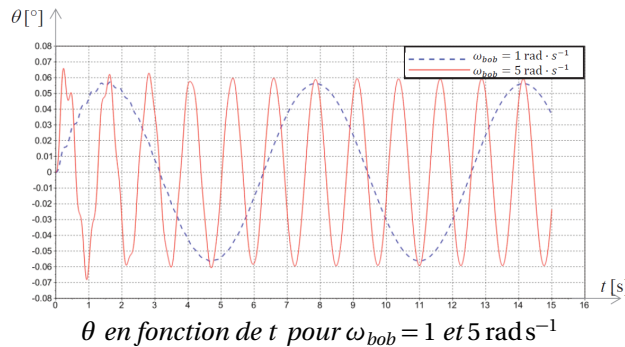
**Question 1**  $\theta$  étant petit, linéariser l'équation du mouvement puis en déduire la fonction de transfert  $H(p) = \frac{\theta(p)}{F(p)}$ . Mettre  $H(p)$  sous la forme canonique d'un système du second ordre dont on donnera les expressions du gain statique  $K_S$ , de la pulsation propre non amortie  $\omega_0$  et du coefficient d'amortissement  $\xi$  en fonction de  $f_v$ ,  $R$ ,  $r$ ,  $m$  et  $g$ .

**Question 2** On prendra les valeurs numériques suivantes pour cette question :  $\omega_0 = 21.8 \text{ rad s}^{-1}$  ;  $K_S = 25 \text{ N}^{-1}$  ;  $\xi = 4 f_v$ . Tracer, sur le document réponse\*\*\*\*, le diagramme asymptotique de Bode en gain, ainsi que l'allure du diagramme réel pour les valeurs suivantes du coefficient de frottement visqueux  $f_v$  :  $f_v = 0,005$ ,  $f_v = 0,05$ ,  $f_v = 0,02$ .

**Question 3** La sollicitation des bobines est sinusoïdale :  $F(t) = F_0 \sin(\omega_{bob} t)$ . Préciser, en justifiant votre réponse, la valeur à laquelle il faut régler la pulsation  $\omega_{bob}$  pour pouvoir observer, au mieux, l'évolution du coefficient de frottement  $f_v$ .

**Question 4** Exprimer, pour un système du second ordre, en fonction de  $\xi$ , le rapport des amplitudes de sortie à  $\omega \rightarrow 0$  et  $\omega = \omega_0$  pour une même amplitude du signal d'entrée.

**Question 5** Les figures suivantes représentent, avec  $f_v$  constant, l'évolution de la position de la bille  $\theta$  (en degrés) en fonction du temps  $t$  (en secondes) pour différentes valeurs de pulsation  $\omega_{bob}$ . À partir de ces courbes et des résultats précédents, déterminer la valeur du coefficient d'amortissement  $\xi$ .



**Question 6** En déduire la valeur numérique du coefficient de viscosité  $\eta$  du sang correspondant.

**Question 7** À partir de ces analyses, en justifiant votre réponse, donner l'allure de la courbe  $\theta$  en fonction de  $t$  obtenue à la pulsation  $\omega_0$  lorsque la viscosité du sang varie au fur et à mesure de la coagulation (si l'on suppose que  $f_v$  augmente avec la coagulation).

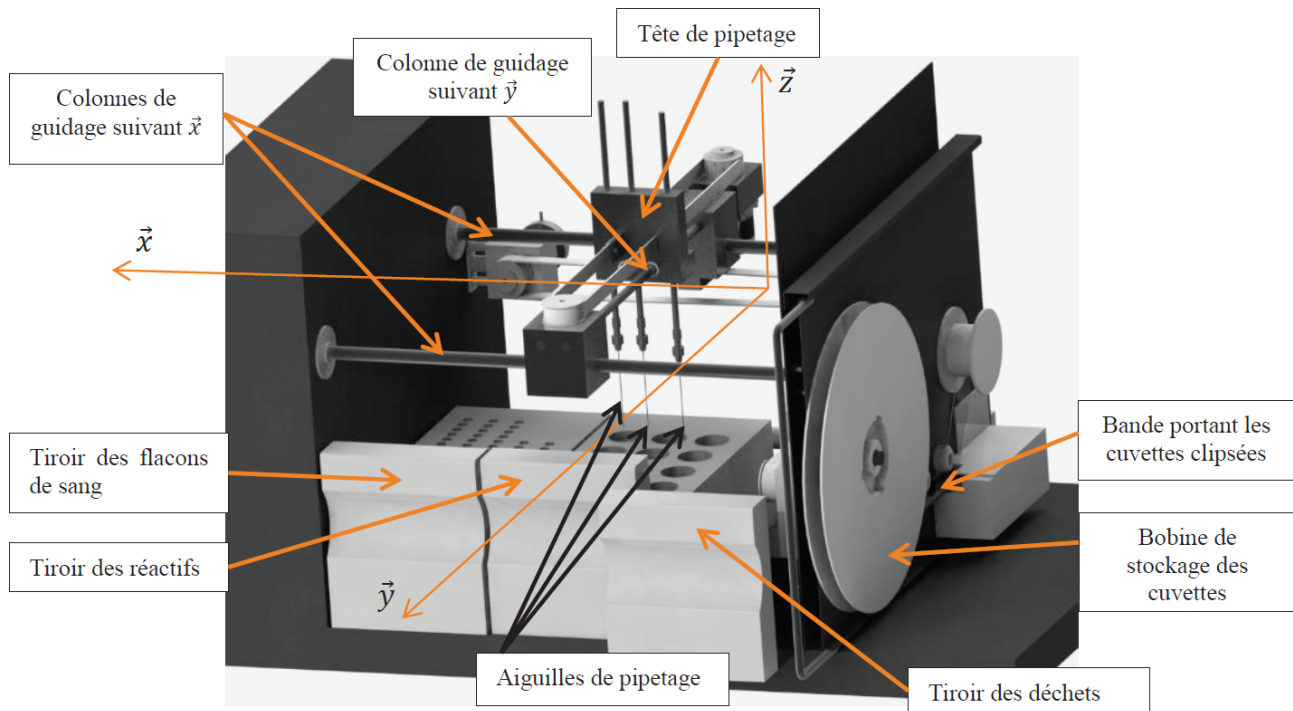
### 1.3 Analyse de l'exigence 2.3 « Prélever les produits par déplacement suivant $\vec{z}$ de la tête de pipetage »

**Objectif** Régler la commande du moteur afin de respecter le cahier des charges.

#### 1.3.1 Présentation

Les aiguilles de prélèvement des doses de plasma et de réactifs sont reliées à la tête de pipetage. Elles peuvent avoir un mouvement de translation verticale (selon la direction  $\vec{z}$ ) par rapport à cette tête. Deux types de réactifs sont utilisés. La tête de pipetage possède donc trois aiguilles : une pour le sang et une par type de réactif.

Successivement, pour chaque produit (plasma puis réactifs), la tête de pipetage est positionnée au dessus du flacon approprié, l'aiguille correspondante prélève la quantité nécessaire, puis l'ensemble tête de pipetage/aiguilles vient déposer le produit dans la cuvette d'analyse. Les aiguilles sont ensuite plongées dans un flacon de nettoyage. L'aspiration et le refoulement des liquides (plasma et réactifs) se font à l'aide d'une même seringue de pipetage motorisée (non représentée).



### 1.3.2 Modélisation de la motorisation

Les déplacements verticaux des aiguilles de la tête de pipetage (axe  $\vec{z}$ ) sont assurés par un ensemble motoréducteur à courant continu et système pignon-crémaillère. On note :

- $\theta_m(t)$  et  $\omega_m(t)$  l'angle et la vitesse angulaire du moteur;
- $\omega_r(t)$  la vitesse angulaire en sortie de réducteur;
- $k_r = \frac{\omega_r}{\omega_m} = \frac{1}{19,2}$  le rapport de réduction du réducteur;
- $c_m(t)$  le couple moteur;
- $J_m$  l'inertie du moteur et  $J_r$  l'inertie du réducteur ramenée à l'arbre moteur;
- $m_p = 0,2 \text{ kg}$  la masse en translation;
- $F_r(t) = 1 \text{ N}$  l'effort de l'opercule sur l'aiguille;
- $c_{\text{res}}$  couple résistant ramené à l'arbre moteur modélisant l'ensemble des frottements, y compris les frottements internes au réducteur ( $c_{\text{res}} \leq 0$ );
- $R_p = 10 \text{ mm}$  le rayon du pignon du système pignon crémaillère;
- $\omega_{mn} = 4150 \text{ tr min}^{-1}$  la vitesse de rotation nominale du moteur;
- $c_{mn} = 5 \times 10^{-3} \text{ Nm}$  le couple moteur nominal;
- $E_c(S/Rg)$  l'énergie cinétique de l'ensemble  $S$  par rapport au référentiel  $R_g$ .

L'inertie équivalente ramenée à l'arbre moteur est donnée par  $J_{\text{eq}} = J_m + J_r + m_p (r_p k_r)^2$ . On établit que  $c_m(t) = c_r(t) + J_{\text{eq}} \dot{\omega}_m(t)$  (4) avec  $c_r(t) = mgR_p k_r + F_r R_p k_r - c_{\text{res}}$ .

La tête de pipetage est asservie en position. Le schéma-bloc de cet asservissement est ébauché sur le document réponse. Un codeur mesure l'angle de rotation moteur et un hacheur module la tension aux bornes du moteur. On note :

- $u(t)$  la tension aux bornes du moteur,  $i(t)$  l'intensité,  $e(t)$  la force électromotrice;
- $R$  la résistance de l'induit,  $L$  son inductance,  $K$  la constante de force électromotrice;
- $K_{\text{cod}} = 2000 \text{ points/tr}$  le gain du codeur tel que  $m_\theta(t) = K_{\text{cod}} \theta_m(t)$ ;
- $K_{\text{adap}}$  le gain permettant d'adapter la consigne  $z_c(t)$  à l'image de la position  $m_\theta(t)$ ;
- $H_{\text{cor}}(p)$  la fonction de transfert du correcteur;
- $K_h = 0,094 \text{ V point}^{-1}$  le gain du hacheur.

Les équations du moteur à courant continu sont les suivantes :  $u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t)$  (5),  $e(t) = K \omega_m(t)$  (6),  $c_m(t) = K i(t)$  (7).

**Question 8** En tenant compte des notations précédentes, compléter sous forme littérale, sur le document réponse\*\*\*, le schéma-blocs de l'asservissement en position.

**Question 9** Déterminer l'expression de  $K_{\text{adap}}$  pour que l'écart calculé  $\varepsilon$  soit proportionnel à l'erreur  $z_c(t) - z(t)$ .  
On note :

- $i_0$  l'intensité initiale ;
- $i_\infty$  et  $\omega_\infty$  l'intensité et la vitesse du moteur en régime permanent ;
- $c_{r0}$  le couple résistant  $c_r(t)$  supposé constant.

**Question 10** Déterminer les expressions de  $\left(\frac{\Omega_m(p)}{U(p)}\right)_{c_{r0}=0}$  et de  $\left(\frac{I(p)}{U(p)}\right)_{c_{r0}=0}$ . Mettre celles-ci sous forme canonique.

Afin de déterminer les caractéristiques du moteur, on applique à celui-ci un échelon de tension ( $u_0(t)$ ) d'amplitude 24 V. On mesure la vitesse  $\omega_m(t)$  et l'intensité  $i(t)$ . Les résultats obtenus sont donnés sur le document réponse \*\*\*\*\*.

**Question 11** À partir de ces courbes et des résultats de la question 10, indiquer si l'hypothèse d'une inductance négligeable est pertinente. Justifier la réponse.

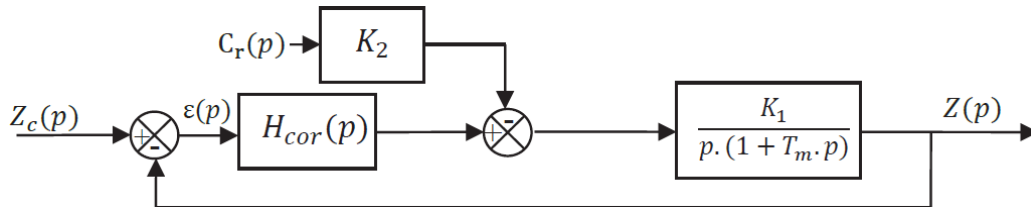
**Question 12** Dans cette hypothèse d'une inductance négligeable et à partir des équations (4), (5), (6) et (7), déterminer les expressions de  $i_0$ ,  $i_\infty$  et  $\omega_\infty$  en fonction de  $u_0$ ,  $c_{r0}$ ,  $R$  et  $K$ .

**Question 13** Dédurre de cette étude les valeurs numériques de  $K$  et  $R$ .

**Question 14** Déterminer la valeur numérique du couple résistant ramené à l'arbre moteur  $c_{r0}$  et de l'inertie équivalente ramenée à l'arbre moteur  $J_{eq}$ .

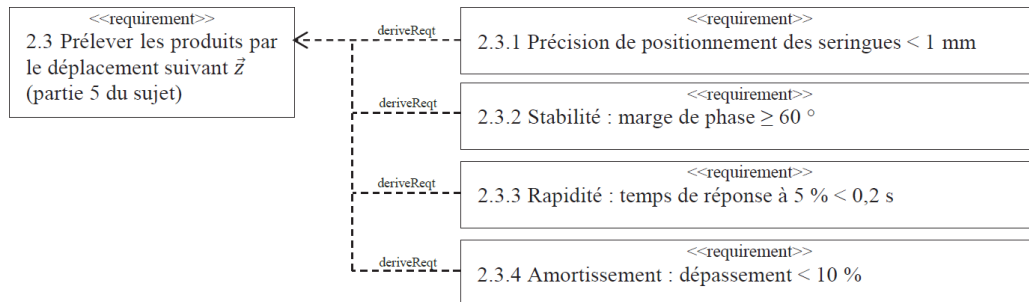
### 1.3.3 Réglage de l'asservissement

Les résultats précédents ont permis de modéliser l'asservissement de position par le schéma-blocs ci-dessous :



avec  $K_2 = 2.78 \times 10^{-2} \text{ N}^{-1}$ ,  $K_1 = 856 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_m = 3 \times 10^{-2} \text{ s}$ . Le couple résistant  $C_r$  est constant et vaut  $C_{r0} = 2.7 \times 10^{-3} \text{ Nm}$ . On suppose le correcteur proportionnel :  $H_{cor}(p) = K_p$ .

On donne le diagramme partiel des exigences.



**Question 15** Déterminer l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte  $H_{bo}(p) = \frac{Z(p)}{\varepsilon(p)}$  ainsi que la fonction de transfert  $H_{cr}(p) = \left(\frac{Z(p)}{C_r(p)}\right)_{Z_c=0}$ .

**Question 16** Déterminer l'erreur statique pour une entrée de type échelon d'amplitude  $Z_{c0}$  dans l'hypothèse d'une perturbation nulle ( $C_{r0} = 0$ ). Déterminer ensuite l'erreur due à une perturbation constante  $C_{r0}$ , définie comme la valeur finale de la position  $z(t)$  dans le cas d'une consigne de position nulle  $z_c = 0$ . En déduire la valeur de  $K_p$  pour satisfaire le critère de précision du cahier des charges.

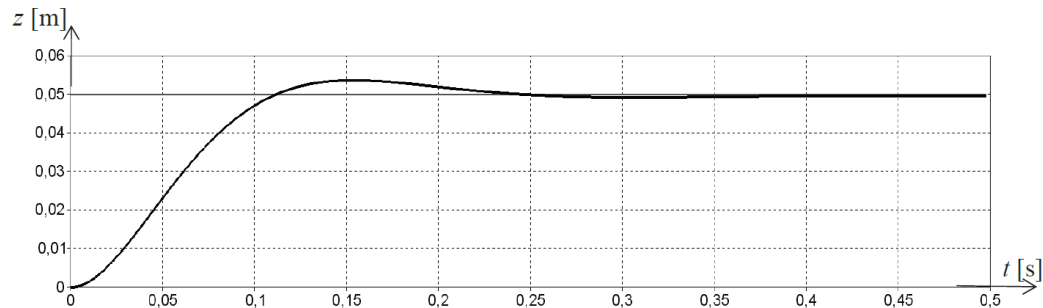
**Question 17** Les diagrammes de Bode en gain et en phase de  $H_{bo}(p)$  sont donnés sur le document réponse pour  $K_p = 1$ . Pour la valeur de  $K_p$  déterminée précédemment, indiquer si le critère de stabilité est satisfait en justifiant votre démarche par les tracés nécessaires sur le document réponse.

Afin d'améliorer le comportement, on implante un correcteur Proportionnel Intégral ayant pour fonction de transfert :  $H_{cor}(p) = \frac{K_p(1 + T_i p)}{T_i p}$  avec  $K_p = 1$  et  $T_i = 1 \text{ s}$ . Les diagrammes de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte avec ce correcteur sont donnés sur le document réponse. On souhaite une marge de phase d'au moins  $60^\circ$ .



**Question 18** Justifier le choix de ce correcteur. Déterminer le coefficient  $K_p$  pour satisfaire au cahier des charges. Justifier vos calculs par les tracés nécessaires sur le document réponse. \*\*\*\*

**Question 19** La figure suivante donne la réponse à un échelon de position de 50 mm avec le correcteur précédemment réglé. Vérifier qu'elle est conforme au cahier des charges. Justifier clairement vos réponses en donnant les valeurs numériques pour chaque critère.



## 2 Mélangeur interne à rotors engrenant

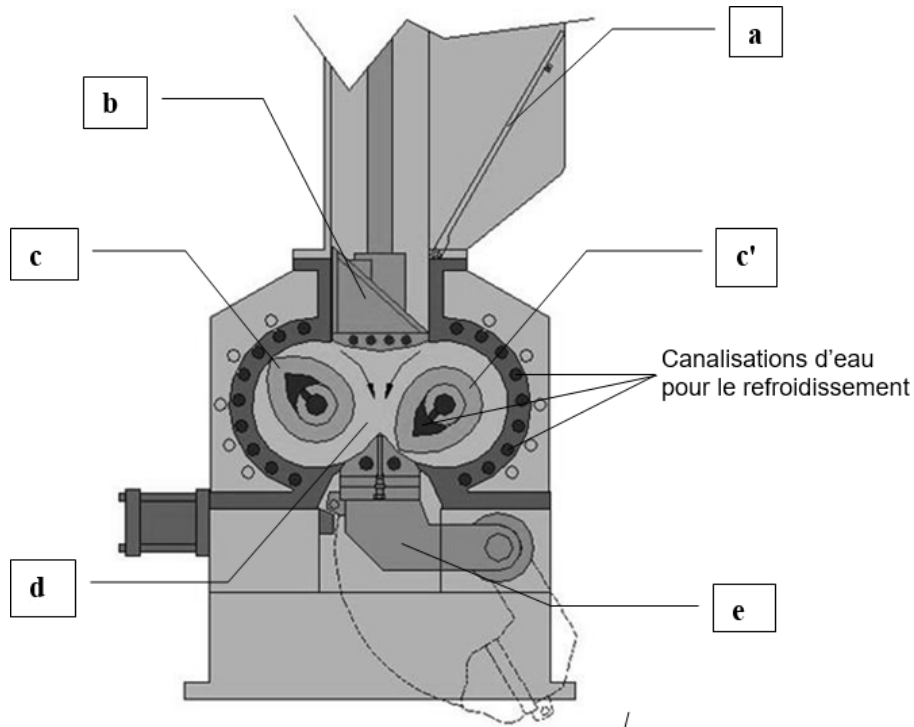
### 2.1 Mise en situation



Un mélangeur interne à rotors engrenants est une machine utilisée dans l'industrie pour effectuer le mélange du caoutchouc et d'additifs divers. Il est, par exemple, utilisé dans la fabrication des pneumatiques. Nous nous intéresserons dans cette étude au modèle K5 de la société Farrel.

Le mélangeur est principalement constitué de :

- une porte de chargement du caoutchouc et des différents additifs (a) ;
- un fouloir permettant de pousser les différents ingrédients vers la chambre de mélangeage (b) ;
- deux rotors à axes parallèles tournant en sens inverses (c) et (c') ;
- une chambre de mélangeage (d) ;
- une porte de déchargement (e).



Le modèle K5 permet de mélanger 100 kg de matière dans une chambre ayant une contenance de 143 litres. Le mélangeur a une masse totale de 16 tonnes. La masse du moteur électrique entraînant les rotors est de 2,5 tonnes.

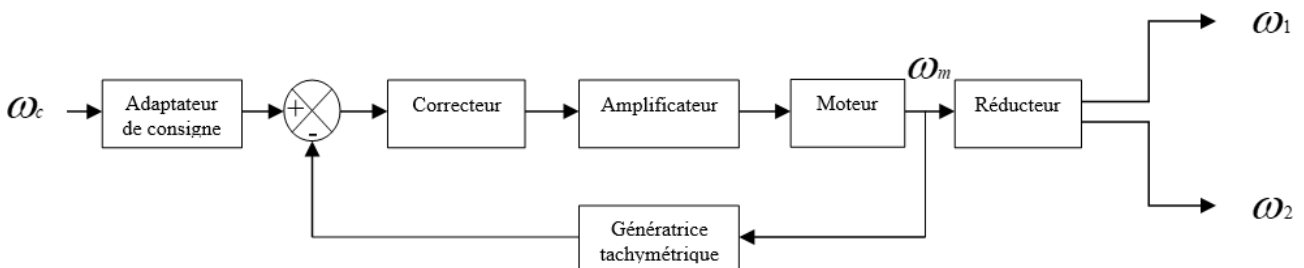
Les caractéristiques du mélange obtenu dépendent, en plus des caractéristiques des différents constituants, des conditions dans lesquelles s'effectue le mélange. Il est donc important de maîtriser, au cours des différentes phases du mélange, la vitesse de rotation des rotors et l'effort exercé par le fouloir tout en surveillant la température dans la chambre qui ne doit pas dépasser une valeur limite (pour que le mélange ne vulcanise pas dans le mélangeur).

**Objectif** Vérifier le dimensionnement de l'actionneur. Choisir et régler un correcteur pour optimiser les performances de l'asservissement de vitesse participant à l'exigence « Effectuer le mélange dans les conditions optimales ».

## 2.2 Construction du schéma-blocs

**Objectif** Mise en place de la structure globale de l'asservissement de vitesse.

L'asservissement en vitesse des rotors est représenté par le schéma suivant :



$\omega_c$  : consigne de vitesse;  $\omega_m$  : vitesse moteur;  $\omega_1$  : vitesse rotor 1;  $\omega_2$  : vitesse rotor 2.

**R** Ces quatre vitesses sont des vitesses angulaires par rapport au bâti.

On donne les équations suivantes caractérisant le moteur :

1.  $C_m(t) + C_r(t) = J \frac{d\omega_m(t)}{dt}$ ;
2.  $u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t)$ ;

3.  $C_m(t) = k_i i(t)$ ;

4.  $e(t) = k_e \omega_m(t)$ .

On donne les équations suivantes caractérisant le moteur :

- $R$  : résistance de l'induit;
- $L$  : inductance de l'induit;
- $u(t)$  : tension d'alimentation du moteur;
- $i(t)$  : courant moteur;
- $e(t)$  : force contre électromotrice;
- $C_m(t)$  : couple disponible sur l'arbre moteur;

- $C_r(t)$  : couple résistant ramené sur l'arbre moteur;
- $\omega_m(t)$  : vitesse de rotation de l'arbre moteur;
- $J$  : moment d'inertie ramené sur l'arbre moteur;
- $k_e$  : constante de force contre électromotrice;
- $k_i$  : constante de couple.

On notera  $C_m(p)$ ,  $C_r(p)$ ,  $\Omega_m(p)$ ,  $U(p)$ ,  $I(p)$  et  $E(p)$  les transformées de Laplace des différentes grandeurs physiques définies ci-dessus.

**Question 20** En considérant que toutes les conditions initiales sont nulles, donner les quatre équations précédentes dans le domaine de Laplace.

**Question 21** Remplir les fonctions de transfert des cases d, e, f et g ainsi que les trois grandeurs physiques manquantes (zones grisées) sur le schéma-bloc fourni sur le cahier réponses.

Le schéma cinématique et les caractéristiques du réducteur sont fournis en annexe B. \*\*\*\*

**Question 22** Donner la valeur algébrique des rapports de réduction  $r_1 = \frac{\omega_1}{\omega_m}$  et  $r_2 = \frac{\omega_2}{\omega_m}$  en fonction des nombres de dents  $Z_i$ . Faire les applications numériques.

**Question 23** Quelle doit être la fonction de transfert  $K_a$  de l'adaptateur de consigne (case a) si l'on veut que l'écart  $\varepsilon$  soit nul quand la vitesse  $\omega_1$  est égale à la vitesse de consigne  $\omega_c$ ? Remplir la case a du document réponse page 5\*\*\*\*.

Dans un premier temps nous considérerons que le correcteur est proportionnel de fonction de transfert  $k_c$ .

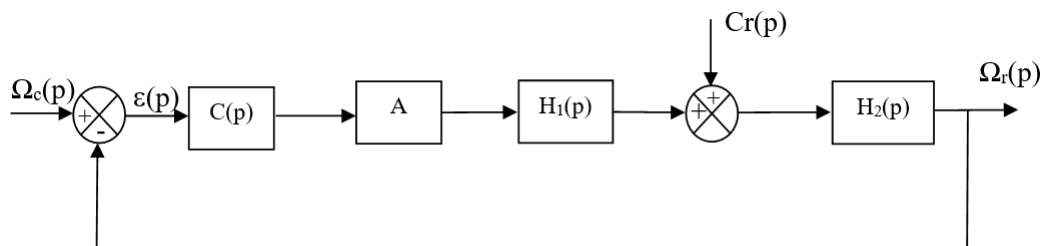
**Question 24** Déterminer l'expression littérale de la fonction de transfert  $H(p) = \frac{K}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0}p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$  de suivi de consigne

( $C_r(p) = 0$ ) en fonction de  $A$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $J$ ,  $k_i$ ,  $k_e$ ,  $k_g$  et  $k_c$ . La lettre sous la forme d'un système canonique d'ordre 2 et identifier les constantes caractéristiques.

## 2.3 Étude de l'asservissement de vitesse

**Objectif** Choisir et régler un correcteur pour répondre au cahier des charges.

Pour cette partie, on utilisera le schéma-blocs à retour unitaire suivant :



On a  $H_1(p) = \frac{3000}{1 + 1,6 \cdot 10^{-2}p}$ ,  $H_2(p) = \frac{5,7 \cdot 10^{-5}(1 + 1,6 \cdot 10^{-2}p)}{1 + 2,9 \cdot 10^{-2}p + 4,6 \cdot 10^{-4}p^2}$  et  $A = 5$  (sans unité). Les valeurs numériques sont dans les unités du système international.

Le cahier des charges impose les conditions suivantes.

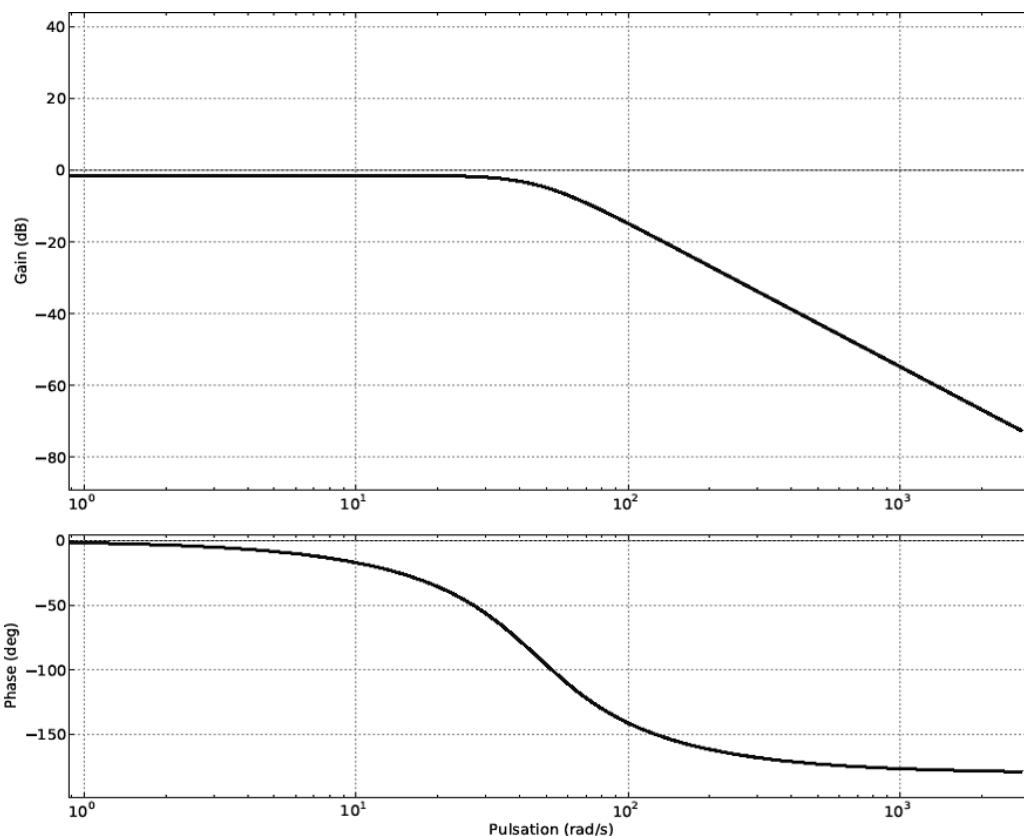


Critères	Niveaux
<u>Stabilité</u>	$M_G = 10$ dB minimum $M_\phi = 40^\circ$ minimum
<u>Précision :</u> - En suivi de consigne, pour une entrée en échelon de vitesse  - En régulation : - Pour une perturbation en échelon de couple - Pour une perturbation en rampe de couple	- Ecart nul en régime établi  - Ecart nul en régime établi  - Ecart maximum de 0,5 tr/min en régime établi pour une rampe de pente -50 N.m/s
<u>Rapidité</u>	- Temps de réponse à 5 % - 0,5 s maximum
<u>Amortissement</u>	- Dépassement - Pas de dépassement de la consigne

R

- La perturbation en échelon de couple modélise une variation brusque du couple résistant au niveau des rotors due à la mise en action du fouloir.
- La perturbation en rampe de couple modélise une variation lente du couple résistant liée à la variation de température du mélange.

Le diagramme de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte du système non corrigé ( $C(p) = 1$ ) est donné ci-dessous.



**Question 25** Le système modélisé ainsi est-il stable? Justifier votre réponse.

**Question 26** Si l'on considère dans un premier temps que le correcteur est proportionnel de fonction de transfert  $C(p) = K$ , donner la valeur que prend l'écart (en fonction de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $K$  s'il est constant) dans chacun des trois cas proposés (on ne demande pas de développer de calculs sur la copie). Le cahier des charges est-il respecté?

**Question 27** Parmi les quatre correcteurs proposés, cocher celui (ou ceux) qui peut (peuvent) permettre de répondre aux trois critères de précision du cahier des charges.

**Question 28** Pour la suite nous utiliserons un correcteur de fonction de transfert  $C(p) = K \frac{1+Tp}{Tp}$ .

**Question 29** Donner le nom de ce correcteur et tracer le diagramme de Bode (asymptotique et allure du diagramme réel) du correcteur seul. Indiquer les pentes et points caractéristiques en fonction de  $K$  et  $T$ .

On choisit la valeur de  $T$  de telle façon que la valeur de la pulsation conduisant à un déphasage de  $-45^\circ$  pour le correcteur seul soit dix fois plus petite que la pulsation pour laquelle la FTBO non corrigée présente un déphasage de  $-90^\circ$ .

**Question 30** Déterminer la valeur de  $T$  correspondante.

**Question 31** Tracer, sur le cahier réponses, le diagramme asymptotique de Bode de la FTBO corrigée avec  $K = 1$  et votre valeur de  $T$ . Indiquer les pentes et points caractéristiques.

On donne, sur le cahier réponses, le diagramme de Black de la FTBO corrigée avec  $T$  déterminé à la question précédente et  $K = 1$ .

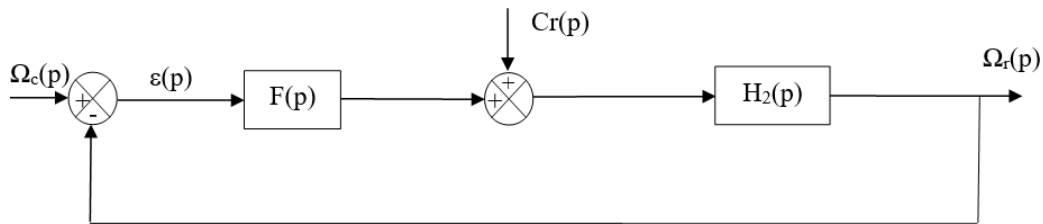
**Question 32** Déterminer la plus grande valeur de  $K$  (notée  $K_{stab}$ ) permettant de satisfaire au critère de stabilité. Vous porterez sur la courbe les tracés que vous jugerez utiles.

**Question 33** On donne, sur le cahier réponses, les courbes de la réponse du système à une entrée en échelon unitaire ( $\omega_c(t) = u(t)$ ) pour  $K$  prenant les valeurs 1 ; 2 ; 3 ; 3,5 et 4.

**Question 34** La valeur de  $K_{stab}$  trouvée à la question précédente est-elle compatible avec les critères de précision en suivi de consigne, d'amortissement et de rapidité? Justifiez votre réponse.

**Question 35** Choisir pour  $K$  une valeur permettant de respecter à la fois les critères de stabilité, amortissement, rapidité et précision en suivi de consigne. Vous justifierez vos réponses et porterez sur la courbe les tracés que vous jugerez utiles.

Le correcteur ayant été dimensionné, le schéma-bloc peut se mettre sous la forme suivante :



On a  $F(p) = \frac{2,25 \cdot 10^5 (1 + 10,2p)}{p(1 + 1,6 \cdot 10^{-2}p)}$  et  $H_2(p) = \frac{5,7 \cdot 10^{-5} (1 + 1,6 \cdot 10^{-2}p)}{1 + 2,9 \cdot 10^{-2}p + 4,6 \cdot 10^{-4}p^2}$ . Les valeurs numériques sont dans les unités du système international.

Nous nous intéressons maintenant à la précision en régulation du système modélisé ainsi. L'étude sera donc faite pour une consigne nulle  $\omega_c(t) = 0$ .

**Question 36** Déterminer l'expression de  $\varepsilon(p)$  en fonction de  $C_r(p)$ ,  $F(p)$  et  $H_2(p)$ .

**Question 37** Que vaut  $\varepsilon_1 = \lim_{t \rightarrow +\infty} \varepsilon(t)$  pour une perturbation en échelon  $C_r(t) = b u(t)$ ? Justifier votre réponse et conclure quant au respect du cahier des charges.

**Question 38** Que vaut  $\varepsilon_2 = \lim_{t \rightarrow +\infty} \varepsilon(t)$  pour une perturbation en rampe  $C_r(t) = c t u(t)$ ? Le cahier des charges est-il respecté (justifier par l'application numérique).