



## Proposition de corrigé

Concours : Concours Centrale-Supélec

Année : 2016

Filière : MP

Épreuve : Sciences Industrielles pour l'Ingénieur

Ceci est une proposition de corrigé des concours de CPGE, réalisée bénévolement par des enseignants de Sciences Industrielles de l'Ingénieur et d'Informatique, membres de l'[UPSTI](http://www.upsti.fr) (Union des Professeurs de Sciences et Techniques Industrielles), et publiée sur le site de l'association :

<https://www.upsti.fr/espace-etudiants/annales-de-concours>

### A l'attention des étudiants

Ce document vous apportera des éléments de corrections pour le sujet traité, mais n'est ni un corrigé officiel du concours, ni un corrigé détaillé ou exhaustif de l'épreuve en question.

L'UPSTI ne répondra pas directement aux questions que peuvent soulever ces corrigés : nous vous invitons à vous rapprocher de vos enseignants si vous souhaitez des compléments d'information, et à vous adresser à eux pour nous faire remonter vos éventuelles remarques.

### Licence et Copyright

Toute représentation ou reproduction (même partielle) de ce document faite sans l'accord de l'UPSTI est **interdite**. Seuls le téléchargement et la copie privée à usage personnel sont autorisés (protection au titre des [droits d'auteur](#)).

En cas de doute, n'hésitez pas à nous contacter à : [corrigesconcours@upsti.fr](mailto:corrigesconcours@upsti.fr).

### Informez-vous !

Retrouvez plus d'information sur les [Sciences de l'Ingénieur](#), l'[orientation](#), les [Grandes Ecoles](#) ainsi que sur les [Olympiades de Sciences de l'Ingénieur](#) et sur les [Sciences de l'Ingénieur au Féminin](#) sur notre site : [www.upsti.fr](http://www.upsti.fr)

L'équipe UPSTI

# Centrale MP 2016 (corrigé)

## Question 1 :

Le PFD est appliqué à la charge (soumise à l'action du câble et de la pesanteur). L'équation de résultante sur  $\vec{z}$  s'écrit :

$$\vec{R}_d(\text{charge}/R_g) \cdot \vec{z} = \vec{R}(\text{câble} \rightarrow \text{charge}) \cdot \vec{z} + \vec{R}(\text{pesanteur} \rightarrow \text{charge}) \cdot \vec{z}$$

$$M \cdot a = T - M \cdot g$$

$$\text{Donc : } \boxed{T = M \cdot (a + g)}$$

La condition pour que le câble soit tendu est  $T$  positif. Cette condition est nécessaire pour respecter l'exigence id 1.2. La tension  $T$  s'annule pour  $a = -g$ , il faut donc une accélération de la charge  $a > -g$ .

## Question 2 :

Lorsque la charge est en translation avec une accélération constante ( $\frac{dz(0)}{dt} = V_0$  et  $z(0) = z_0$ ) :

$$\frac{d^2z(t)}{dt^2} = a \quad \text{et donc} \quad z(t) = \frac{a \cdot t^2}{2} + V_0 \cdot t + z_0$$

Lorsque l'utilisateur lâche la poignée,  $F_{op} = 0$  (en négligeant la masse de la poignée).

Avec une commande proportionnelle : *consigne* =  $K \cdot F_{op}$ . La consigne de mouvement doit donc être une consigne de vitesse (et non d'accélération) pour arrêter la charge lorsque l'utilisateur lâche la poignée.

## Question 3 :

Dans l'hypothèse où le système est linéaire (avec une entrée  $F_{op}$  pouvant atteindre  $40N$  en valeur absolue, voir id 1.4.4) la réponse en vitesse du système pour une entrée  $F_{op} = -40N$  est deux fois la réponse de la figure 6 (pour une entrée  $F_{op} = -20N$ ).

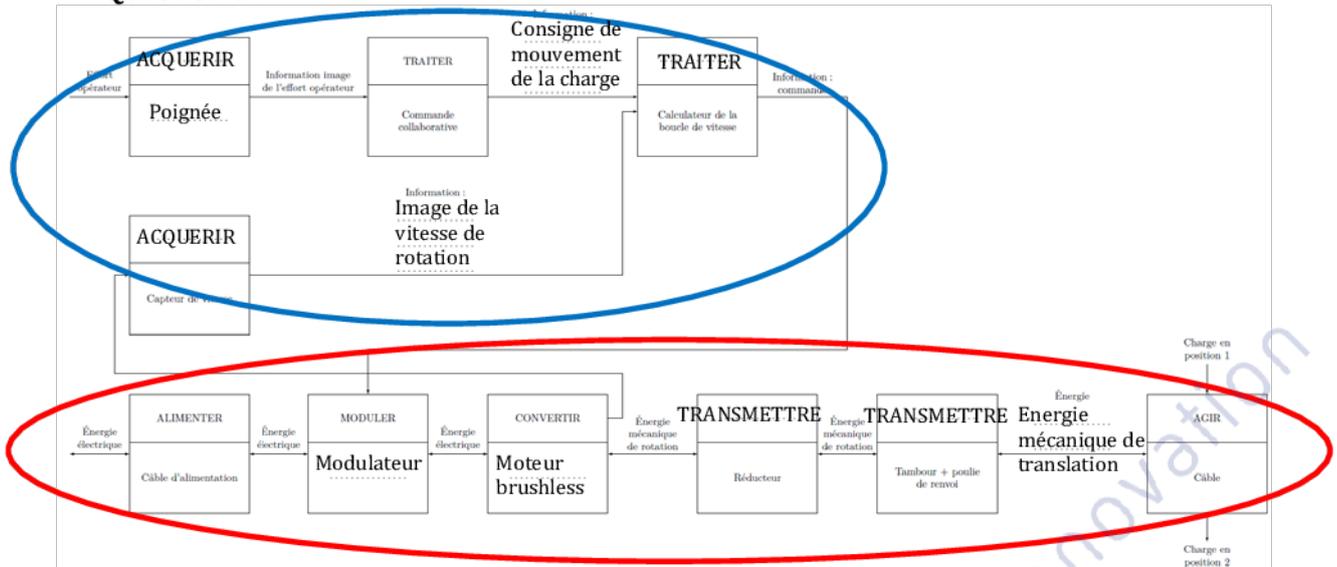
La vitesse maximale est alors supérieure à  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  en valeur absolue. L'exigence id 1.4.1 n'est donc pas satisfaite.

La réponse pseudopériodique en vitesse de la figure 6 donne une alternance d'accélération et de décélérations entraînant des vibrations de la charge (le système réel n'étant pas parfaitement rigide). L'exigence id 1.4.3 n'est donc pas satisfaite.

## Question 4 :

Un système ayant la réponse en vitesse de la figure 7 (sans DSC) présentera lui des oscillations. L'introduction du filtre DSC permet de les supprimer et ainsi de satisfaire l'exigence id 1.4.3.

### Question 5 :



### Question 6 :

Il est demandé la relation entre la vitesse de la charge  $v(t)$  et la vitesse de rotation de moteur  $\omega_m(t)$  (indice manquant dans l'énoncé). Cette relation sera de la forme :  $v(t) = K_{rigide} \cdot \omega_m(t)$ .

- Le réducteur impose :  $\omega_T(t) = \frac{1}{\rho} \cdot \omega_m(t)$
- Enroulement du câble sur le tambour :  $v(t) = R \cdot \omega_T(t)$

Il est donc déduit :  $v(t) = \frac{R}{\rho} \cdot \omega_m(t)$

Donc  $K_{rigide} = \frac{R}{\rho}$  A.N. :  $K_{rigide} = 3,15 \cdot 10^{-3} m$

Lorsque le moteur tourne à sa vitesse maximale ( $6200 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ ) la vitesse de la charge est de  $2,04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . L'exigence id 1.4.1 est donc satisfaite.

### Question 7 :

L'équation de mouvement du système est établie à l'aide du théorème de l'énergie cinétique appliqué à l'ensemble des éléments en mouvement  $\Sigma = \{\text{capteur, rotor du moteur, réducteur, tambour, poulie, câble, charge}\}$ .

#### Puissances intérieures :

Dans l'hypothèse où les liaisons sont supposées parfaites, les puissances des actions mutuelles sont nulles.

#### Puissances extérieures :

- Puissance de l'action de la pesanteur (seule est non nulle la puissance de l'action de pesanteur sur la charge, pour les autres éléments le centre d'inertie reste à altitude constante et/ou l'action de pesanteur est négligée),
- Puissance de l'action du stator sur le rotor du moteur,
- Les puissances des actions de liaison de la pièce fixe sur les pièces mobiles sont nulles dans l'hypothèse où les liaisons sont parfaites :

$$P(\text{pièce fixe} \rightarrow \text{pièce mobile}/R_g) = P(\text{pièce fixe} \leftrightarrow \text{pièce mobile}) + P(\text{pièce mobile} \rightarrow \text{pièce fixe}/R_g) = 0$$

Nulle (liaison parfaite)      Nulle (pièce fixe fixe par rapport à  $R_g$ )

Le théorème de l'énergie cinétique s'écrit donc :

$$\frac{dT(\Sigma/R_g)}{dt} = P(\text{pesanteur} \rightarrow \text{charge}/R_g) + P(\text{stator} \rightarrow \text{rotor}/R_g)$$

### Question 8 :

Calcul de l'énergie cinétique (seules les inerties de la charge et du motoréducteur sont prises en compte) :

$$T(\Sigma/R_g) = T(\text{motoréducteur}/R_g) + T(\text{charge}/R_g) \\ = \frac{1}{2} \cdot J_0 \cdot \omega_m(t)^2 + \frac{1}{2} \cdot M \cdot v(t)^2 = \frac{1}{2} (J_0 + M \cdot K_{rigide}^2) \cdot \omega_m(t)^2$$

Calcul des puissances :

$$P(\text{pesanteur} \rightarrow \text{charge}/R_g) = -M \cdot g \cdot v(t) = -M \cdot g \cdot K_{rigide} \cdot \omega_m(t)$$

$$P(\text{stator} \rightarrow \text{rotor}/R_g) = C_m(t) \cdot \omega_m(t)$$

Donc le théorème de l'énergie cinétique permet d'écrire :

$$(J_0 + M \cdot K_{rigide}^2) \cdot \omega_m(t) \cdot \dot{\omega}_m(t) = C_m(t) \cdot \omega_m(t) - M \cdot g \cdot K_{rigide} \cdot \omega_m(t)$$

Avec  $\omega_m(t)$  non nul :

$$(J_0 + M \cdot K_{rigide}^2) \cdot \dot{\omega}_m(t) = C_m(t) - M \cdot g \cdot K_{rigide}$$

De la forme :

$$A \cdot \dot{\omega}_m(t) = C_m(t) - B$$

Avec :

$$\boxed{A = J_0 + M \cdot K_{rigide}^2} \quad \text{moment d'inertie équivalent rapporté au mouvement du moteur} \\ \boxed{B = M \cdot g \cdot K_{rigide}}$$

### Question 9 :

Accélération de la charge :

$$\dot{v}(t) = K_{rigide} \cdot \dot{\omega}_m(t) = \frac{K_{rigide}}{A} \cdot (C_m(t) - B) \quad \text{Avec } K_{rigide}, A \text{ et } B \text{ positif}$$

L'accélération est maximale en descente ( $\dot{v}(t)$  maximal) pour  $C_m(t) = -10,8 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

Pour  $M = 200 \text{ kg}$  :

$$A = 5,13 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad B = 6,18 \text{ N} \cdot \text{m} \quad |\dot{v}(t)|_{\max} = 10,41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Cette accélération ne pourra pas être effectivement atteinte car le câble ne va pas rester tendu (voir question 1). L'exigence id 1.2 n'est pas satisfaite.

### Question 10 :

L'exigence id 1.2 (accélération de la charge  $a > -g$ ) peut être satisfaite en limitant le couple du moteur (en valeur absolue) (voir l'équation de la question 9 :  $\dot{v}(t) = \frac{K_{rigide}}{A} \cdot (C_m(t) - B)$ ). Or, pour un moteur brushless,  $C_m(t) = K_m \cdot i(t)$ . La limitation de l'intensité va limiter le couple moteur et donc l'accélération.

Remarque :

$$\dot{v}(t) > -g \text{ implique } -g < \frac{K_{rigide}}{A} \cdot (C_m(t) - B)$$

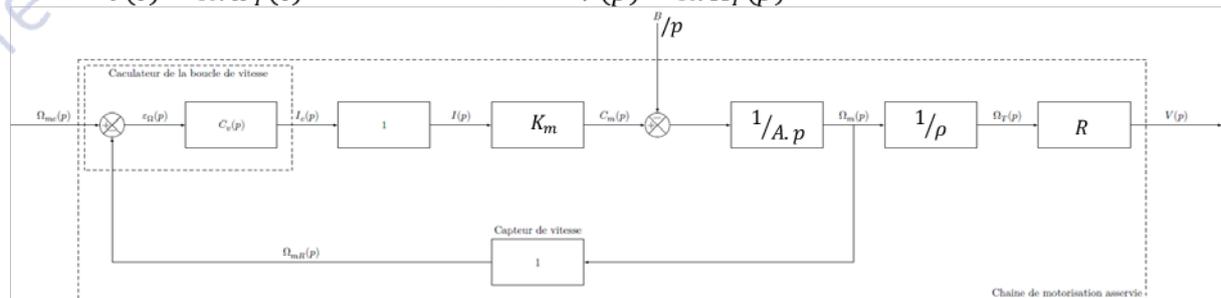
$$\text{Donc } C_m(t) > B - \frac{A \cdot g}{K_{rigide}} = M \cdot g \cdot K_{rigide} - \frac{(J_0 + M \cdot K_{rigide}^2) \cdot g}{K_{rigide}} = -\frac{J_0 \cdot g}{K_{rigide}}$$

Et donc  $|C_m|_{\max} < \frac{J_0 \cdot g}{K_{rigide}}$  La valeur limite ne dépend pas de la masse de la charge.

### Question 11 :

Equations du système et leurs transformées de Laplace (conditions initiales nulles) :

- $C_m(t) = K_m \cdot i(t) \quad \rightarrow \quad C_m(p) = K_m \cdot I(p)$
- $A \cdot \dot{\omega}_m(t) = C_m(t) - B(t) \quad \rightarrow \quad \Omega_m(p) = \frac{C_m(p) - B(p)}{A \cdot p} \quad (B(t) = B \cdot u(t) \text{ et } B(p) = \frac{B}{p})$
- $\omega_T(t) = \frac{1}{\rho} \cdot \omega_m(t) \quad \rightarrow \quad \Omega_T(p) = \frac{1}{\rho} \cdot \Omega_m(p)$
- $v(t) = R \cdot \omega_T(t) \quad \rightarrow \quad V(p) = R \cdot \Omega_T(p)$



**Question 12 :**

Marge de phase du système non corrigé :

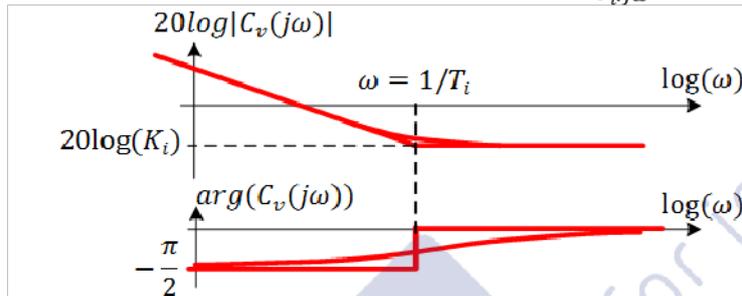
$$M_\varphi = \arg(FTBO_{nc}(j\omega_{0dB})) + 180^\circ = \arg\left(\frac{K_{BO}}{j\omega_{0dB}}\right) + 180^\circ = 90^\circ > 80^\circ$$

Le critère de stabilité est satisfait.

**Question 13 :**

La FTBO corrigée est de classe 1. Le critère de précision vis-à-vis de l'entrée en échelon est donc satisfait. Mais l'intégration est en aval de la perturbation. Le critère de précision vis-à-vis de la perturbation constante n'est donc pas satisfait, d'où l'utilité du correcteur PI.

Diagramme de Bode asymptotique du correcteur PI :  $C_v(j\omega) = \frac{K_i(1+T_i j\omega)}{T_i j\omega}$



**Question 14 :**

La FTBO corrigée est notée :  $FTBO_c(p) = C_v(p) \cdot FTBO_{nc}(p) = \frac{K_i K_{BO}(1+T_i p)}{T_i p^2}$

Le critère de rapidité impose la pulsation de coupure à 0dB :  $\omega_{0dB} = 40 \text{ rad. s}^{-1}$

La marge de phase est alors :

$$M_\varphi = \arg(FTBO_c(j\omega_{0dB})) + 180^\circ = \arg\left(-\frac{K_i K_{BO}(1+T_i j\omega_{0dB})}{T_i \omega_{0dB}^2}\right) + 180^\circ$$

$$= -180^\circ + \arctan(T_i \cdot \omega_{0dB}) + 180^\circ = \arctan(T_i \cdot \omega_{0dB})$$

Valeur de  $T_i$  pour obtenir une marge de phase de  $80^\circ$  :

$$T_i = \frac{\tan(80^\circ)}{\omega_{0dB}} \quad \text{A.N. : } T_i = 0,14\text{s}$$

Valeur de  $K_i$  pour avoir effectivement une pulsation de coupure :  $\omega_{0dB} = 40 \text{ rad. s}^{-1}$

$$|FTBO_c(j\omega_{0dB})| = 1 \quad \text{implique} \quad \frac{K_i K_{BO} \sqrt{1+T_i^2 \cdot \omega_{0dB}^2}}{T_i \cdot \omega_{0dB}^2} = 1$$

$$\text{Donc } K_i = \frac{T_i \cdot \omega_{0dB}^2}{K_{BO} \sqrt{1+T_i^2 \cdot \omega_{0dB}^2}} \quad \text{A.N. : } K_i = 0,18$$

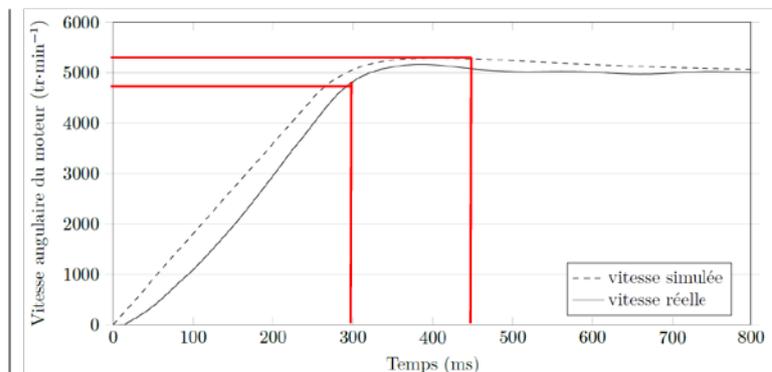
Tous les critères de performances sont ainsi satisfaits.

**Question 15 :**

Les deux réponses (simulée et expérimentale) semblent avoir la même valeur finale ( $5000 \text{ tr. min}^{-1}$ ).

Les temps de réponse à 5% sont :

- $Tr_{5\%} = 450\text{ms}$  pour la réponse simulée
- $Tr_{5\%} = 300\text{ms}$  pour la réponse expérimentale



**Question 16 :**

La fonction de transfert  $\frac{S_j(p)}{\Omega_m(p)}$  est déterminée à l'aide des équations du système :

- Equation issue du PFD appliqué au corps d'épreuve :

$$-m_j \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = m_j \frac{d^2 (z_j(t) - z(t))}{dt^2} + c_j \frac{d(z_j(t) - z(t))}{dt} + k_j \cdot (z_j(t) - z(t))$$

- Equation du capteur :

$$S_j(t) = k_{capt} \cdot k_j \cdot (z_j(t) - z(t))$$

- Relation cinématique :

$$\frac{dz(t)}{dt} = K_{rigide} \cdot \omega_m(t)$$

Il est déduit l'équation temporelle du système :

$$-m_j \cdot K_{rigide} \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{1}{k_{capt} \cdot k_j} \left( m_j \frac{d^2 S_j(t)}{dt^2} + c_j \frac{dS_j(t)}{dt} + k_j \cdot S_j(t) \right)$$

Transformation de Laplace (conditions initiales nulles) :

$$-m_j \cdot K_{rigide} \cdot k_{capt} \cdot k_j \cdot \Omega_m(p) \cdot p = (m_j \cdot p^2 + c_j \cdot p + k_j) \cdot S_j(p)$$

Fonction de transfert :

$$\frac{S_j(p)}{\Omega_m(p)} = \frac{-m_j \cdot K_{rigide} \cdot k_{capt} \cdot p}{1 + \frac{c_j}{k_j} \cdot p + \frac{m_j}{k_j} \cdot p^2}$$

De la forme  $\frac{K_j \cdot p}{1 + \frac{2\xi_j}{\omega_j} \cdot p + \frac{1}{\omega_j^2} \cdot p^2}$  avec :

$$\begin{cases} K_j = -m_j \cdot K_{rigide} \cdot k_{capt} \\ \omega_j = \sqrt{\frac{k_j}{m_j}} \\ \xi_j = \frac{c_j}{2\sqrt{k_j \cdot m_j}} \end{cases} \quad \text{A.N. : } \omega_j = 316 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

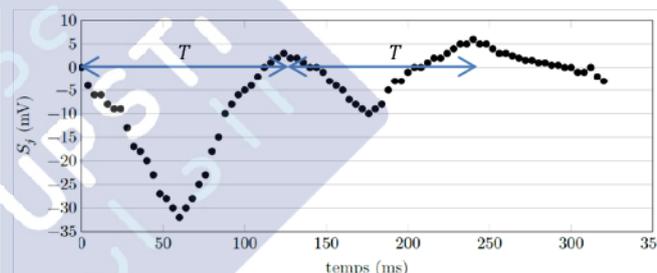
### Question 17 :

Il est observé sur la courbe de la figure 12 une pseudopériode de  $T = 120 \text{ ms}$ . Avec un facteur d'amortissement de  $\xi = 0,6$  la pulsation propre est :

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T\sqrt{1-\xi^2}}$$

A.N. :  $\omega_0 = 65 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Les deux pulsations propres sont différentes, le capteur n'est donc pas à l'origine des vibrations.



### Question 18 :

Actions mécaniques appliquées à S :

- Action du brin 1 sur S :

$$\mathcal{F}(\text{Brin1} \rightarrow S) = \begin{Bmatrix} T_1 \vec{x} \\ \vec{0} \end{Bmatrix} \quad T_1 \text{ positif}$$

( $T_1 = T$  si les inerties du câble et de la poulie sont négligées)

- Action de 0 sur 1 (glissière de direction  $\vec{z}$ , ressort et amortisseur) :

$$\mathcal{F}(0 \rightarrow 1) = \begin{Bmatrix} X_{01} \vec{x} + Y_{01} \vec{y} - (k \cdot (l - l_i) + c \cdot \dot{z}_p) \vec{z} \\ L_{01} \vec{x} + M_{01} \vec{y} + N_{01} \vec{z} \end{Bmatrix}$$

( $l = z_p + l_0$  étant la longueur du ressort et  $l_i$  sa longueur libre)

- Action de la pesanteur sur S :

$$\mathcal{F}(\text{pesanteur} \rightarrow S) = \begin{Bmatrix} -(M_1 + M) \cdot g \cdot \vec{z} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}$$

( $G_s$  centre d'inertie de S, seules les actions de pesanteur sur la charge et le solide 1 sont prises en compte)

Condition d'équilibre ( $z_p = 0$  et  $l = l_0$ ) (PFS appliqué à S) :

$$\mathcal{F}(\text{Brin1} \rightarrow S) + \mathcal{F}(O \rightarrow 1) + \mathcal{F}(\text{pesanteur} \rightarrow S) = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Equation de résultante sur  $\vec{z}$  :

$$-k \cdot (l_0 - l_i) - (M_1 + M) \cdot g = 0$$

PFD appliqué à S :

$$\mathcal{D}(S/R_g) = \mathcal{F}(\text{Brin1} \rightarrow S) + \mathcal{F}(O \rightarrow 1) + \mathcal{F}(\text{pesanteur} \rightarrow S)$$

Equation de résultante sur  $\vec{z}$  :

$$-(k \cdot (z_p + l_0 - l_i) + c \cdot \dot{z}_p) - (M_1 + M) \cdot g = M_1 \cdot \ddot{z}_p + M \cdot \ddot{z}$$

En simplifiant à l'aide de la condition d'équilibre :

$$-(k \cdot z_p + c \cdot \dot{z}_p) = M_1 \cdot \ddot{z}_p + M \cdot \ddot{z}$$

De la forme :

$$\alpha \cdot \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + \beta \cdot \frac{dz_p(t)}{dt} = -\lambda \cdot z_p(t) - \mu \cdot \frac{dz_p(t)}{dt}$$

Avec :

$$\boxed{\alpha = M \quad \beta = M_1 \quad \lambda = k \quad \mu = c}$$

### Question 19 :

Démarches permettant d'établir les équations 2, 3 et 4 :

- Equation 2 : Théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble {motoréducteur, tambour} (Les inerties du câble et de la poulie étant négligées, la tension du câble est identique dans les deux brins, les liaisons sont supposées parfaites).
- Equation 3 : PFD appliqué à la charge (équation de résultante sur  $\vec{z}$ ).
- Equation 4 : Relation cinématique (câble inextensible).

### Question 20 :

La simulation est réalisée avec une consigne de vitesse en échelon d'amplitude  $3000 \text{ tr. min}^{-1}$ . Elle peut donc être comparée au résultat de l'étude expérimentale figure 12. Les valeurs des paramètres  $k = 180000 \text{ N. m}^{-1}$  et  $c = 90 \text{ N. s. m}^{-1}$  sont retenues (courbe en trait discontinu) car les allures des courbes issues de l'expérimentation et de la simulation sont alors similaires (les dates et les amplitudes des dépassements sont aussi très proches).

### Question 21 :

Les résultats de simulation et de mesure sont proches :

- la tangente à l'origine est nulle dans les deux cas,
- Le comportement asymptotique de la courbe expérimentale n'est pas connu (une durée plus longue d'enregistrement serait nécessaire). La courbe issue de la simulation semble conserver des oscillations autour de la valeur  $9,5 \text{ m. s}^{-1}$ .
- Les pseudo-pulsations sont proches.

### Question 22 :

Transmittance isochrone du filtre DSC :  $F(j\omega) = \frac{(\omega_0^2 - \omega^2) + 2 \cdot j \cdot \zeta_F \cdot \omega_0 \cdot \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2) + 2 \cdot j \cdot \omega_0 \cdot \omega}$

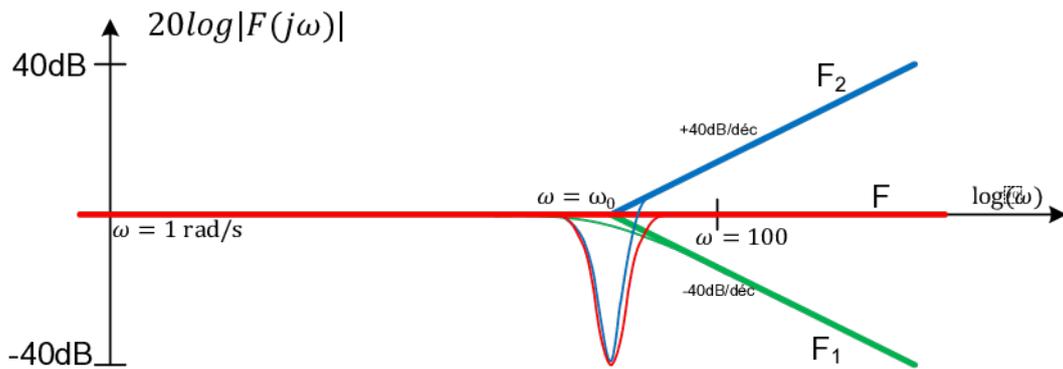
A la pulsation  $\omega = \omega_0$  :  $F(j\omega_0) = \zeta_F$

D'où le gain à la pulsation  $\omega_0$  :  $G_{dB}(\omega_0) = 20 \log(\zeta_F) = -40 \text{ dB}$

Pour tracer l'allure du diagramme de Bode du gain de  $F(j\omega)$ , il est remarqué que cette fonction est le rapport de deux seconds ordres  $F(j\omega) = F_1(j\omega)/F_2(j\omega)$  avec :

$$F_1(j\omega) = \frac{1}{1 + 2 \cdot j \cdot \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \quad \text{et} \quad F_2(j\omega) = \frac{1}{1 + 2 \cdot j \cdot \zeta_F \cdot \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$$

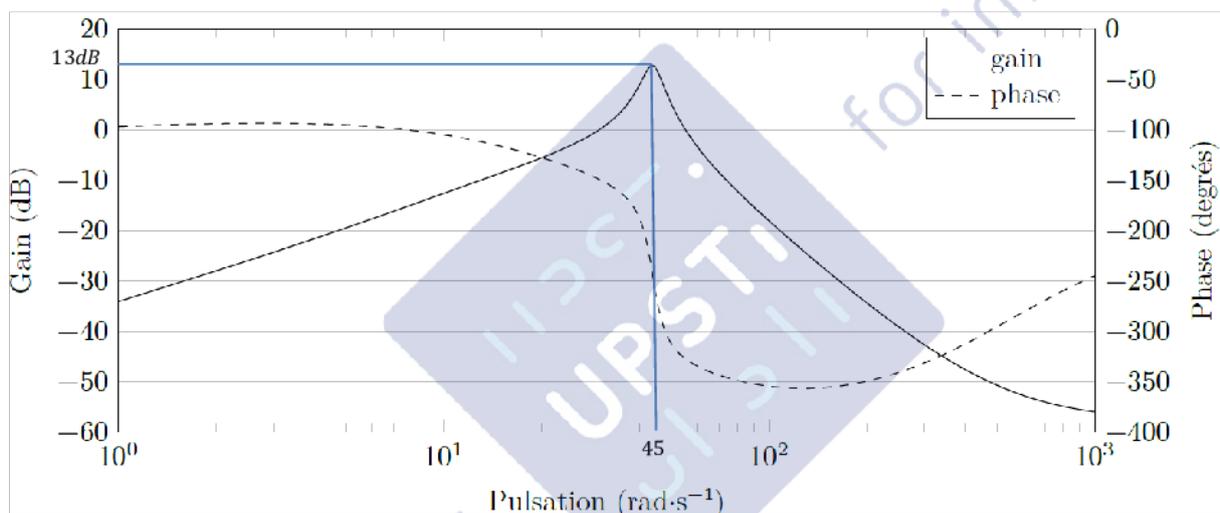
Le diagramme de Bode du gain du filtre est donc la différence des diagrammes de ces deux fonctions.



Le filtre étant en série, la fonction de transfert en boucle ouverte corrigée est :

$$FTBO_c(p) = F(p) \cdot FTBO_{nc}(p)$$

Donc le gain de la fonction de transfert en boucle ouverte corrigée est la somme des gains du correcteur et de la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée. A la pulsation  $\omega_0$  ce gain est de  $-40 + 13 = -27\text{dB}$  (voir lecture du gain de la FTBO non corrigée ci-dessous).



### Question 23 :

La pulsation  $\omega_0$  coïncide avec la pulsation de résonance de la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée. Le filtre va gommer cette résonance.

### Question 24 :

Fonction `Rejecteur` en langage python (il est affecté la valeur nulle à  $s_f(0)$  et  $s_f(1)$ ) :

```
def Rejecteur(Sj, b0, b1, b2, a1, a2) :
    Sf=[0, 0]
    for k in range(2, len(Sj)) :
        Sf.append(b0*Sj[k]+b1*Sj[k-1]+b2*Sj[k-2]-a1*Sf[k-1]-a2*Sf[k-2])
    return Sf
```

### Question 25 :

Dans l'hypothèse où le système est linéaire (avec une entrée  $F_{op}$  pouvant atteindre 40N en valeur absolue, voir id 1.4.4) la réponse en vitesse du système pour une entrée  $F_{op} = -40N$  est deux fois la réponse de la figure 20 (pour une entrée  $F_{op} = -20N$ ).

- La vitesse maximale est alors légèrement supérieure à  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  en valeur absolue. L'exigence id 1.4.1 est donc presque satisfaite ...
- La réponse en vitesse de la figure 20 n'est pas pseudopériodique. L'exigence id 1.4.3 est donc satisfaite.

- L'accélération maximale (en valeur absolue pour une entrée  $F_{op} = -40N$ ) correspond au double de la pente maximale de la courbe figure 20 (si aucune limitation d'intensité n'a été mise en œuvre). Cette accélération est supérieure à  $g$  (en valeur absolue) (voir question 1). Une limitation d'intensité est donc nécessaire pour satisfaire l'exigence id 1.2 (voir question 10).

**Question 26 :**

Une multiplication par deux de l'entrée n'induit pas une multiplication de la sortie par deux de la sortie. Le système n'est donc pas linéaire.

**Question 27 :**

Vérification des performances :

- id 1.4.1 : presque satisfait (vitesse atteignant  $2,2 m.s^{-1}$ ),
- id 1.4.3 : satisfait (pas d'oscillation de la charge),
- id 1.4.4 : semble satisfait (pas de mouvement pour  $F_{op} = -0,2 N$ ).
- id 1.2 : avec  $-40 N$  et  $M = 200 kg$ , il est mesuré curieusement une accélération de  $-12 m.s^{-2}$ , ce qui est incompatible avec le système à câble (voir question 1).



teaching sciences

for innovation