

Proposition de corrigé

Concours : Concours Centrale-Supélec

Année : 2015

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.

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

L'équipe UPSTI



S2I

CORRIGÉ UPSTI

MP

2015

Prothèse de main myoélectrique

I. Comparatif des structures de commande des mouvements des doigts

Q 1. – Cf document réponse DR1.

Q 2. – Il manque les capteurs sensoriels de la chaîne d'information. Ainsi, lors de la prise en main, l'amputé ne peut pas gérer la force de serrage du verre.

II. La prothèse de main permet-elle de saisir un verre à eau ?

II.A. – *Étude du dispositif entre la bielle (2) et la phalangette (7)*

Q 3. – Le degré de mobilité de la liaison entre les solides (0) et (3) est une rotation d'axe $(D, \vec{z}_0)$. Pour une main saine, on a en plus une rotation d'axe $(D, \vec{y}_0)$. Cette seconde rotation est, à la fois difficile à réaliser et peu utile pour serrer un verre.

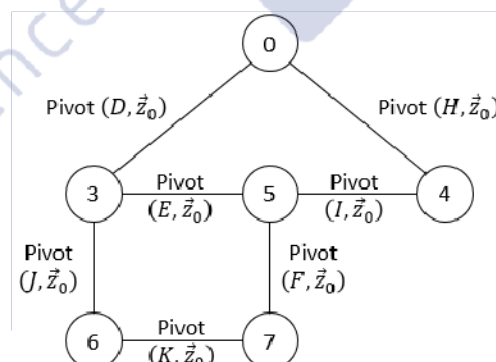
Q 4. –

$$\begin{aligned}\overrightarrow{HG} &= \overrightarrow{HD} + \overrightarrow{DE} + \overrightarrow{EF} + \overrightarrow{FG} \\ \overrightarrow{HG} &= -d\vec{x}_0 - e\vec{y}_0 + l_3\vec{x}_3 + l_5\vec{x}_5 + l_7\vec{x}_7\end{aligned}$$

dans la base $(\vec{x}_0, \vec{y}_0)$, il vient

$$\begin{cases} x_G = -d + l_3 \cos \theta_3 + l_5 \cos \theta_5 + l_7 \cos \theta_7 \\ y_G = -e + l_3 \sin \theta_3 + l_5 \cos \theta_5 + l_7 \cos \theta_7 \end{cases}$$

Q 5. – Graphe des liaisons de l'index



On effectue deux fermetures de chaîne géométrique :

- Première fermeture :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{HI} &= \overrightarrow{HD} + \overrightarrow{DE} + \overrightarrow{EI} \\ l_4\vec{x}_4 &= -d\vec{x}_0 - e\vec{y}_0 - l_3\vec{x}_3 + R_5\vec{x}_5'\end{aligned}$$

Comme on ne veut pas de θ_4 , on élève au carré soit

$$l_4^2 = d^2\vec{x}_0 + e^2 + l_3^2 + R_5^2 + 2[d l_3 \cos(\theta_3) - d R_5 \cos(\theta_5 + \alpha_5) + e l_3 \sin(\theta_3) - e R_5 \sin(\theta_5 + \alpha_5)]$$

On peut ainsi obtenir θ_5 en fonction de θ_3

- Seconde fermeture

$$\overrightarrow{JK} = \overrightarrow{JE} + \overrightarrow{EF} + \overrightarrow{FK}$$

On note $\overrightarrow{JK} = l_6\vec{x}_6$ (un oubli de l'énoncé ?)

$$l_6\vec{x}_6 = R_3\vec{x}_3' + l_5\vec{x}_5 - R_7\vec{x}_7'$$

Ici aussi, on ne veut pas de θ_6 donc on peut élever au carré soit

$$l_6^2 = R_3^2 + l_5^2 + R_7^2 + 2[R_3 l_5 \cos(\theta_5 - \theta_3 - \alpha_3) - l_6 R_7 \cos(\theta_7 + \alpha_7 - \theta_3 - \alpha_3) - l_5 R_7 \cos(\theta_7 + \alpha_7 - \theta_5)]$$

On obtient une relation entre θ_5 , θ_7 et θ_3

Q 6. – La courbe figure 7 montre que la main peut serrer des verres de diamètre compris entre 31 mm et 86 mm, ce qui est le cas de tous les verres sauf le V4 qui est d'un diamètre supérieur. Donc le degré de satisfaction est **SATISFAISANT**.

III. La prothèse de main est-elle capable de maintenir un verre à eau sans le casser ?

III.A. – Efforts de maintien et de rupture du verre

III.A.1) Effort de maintien en équilibre du verre

Q 7. On note

- $\vec{P}$ le poids du verre remplis totalement d'eau
- $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ l'accélération de pesanteur
- N l'effort normal exercé par le doigt supposé perpendiculaire au champ de pesanteur
- T l'effort de frottement supposé parallèle au champ de pesanteur
- On se place à la limite du glissement où $T = fN$ pour obtenir l'effort normal minimal nécessaire à l'équilibre.

On applique le PFS au verre on doit donc avoir $2fN > mg$ Cf DR2

III.A.2) Effort de rupture du verre

Q 8. Tous les verres résistent sauf le verre en plastique qui s'écrase. Le critère est donc SATISFAISANT.

III.A.3) Synthèse intermédiaire

III.B. – Modélisation du comportement dynamique de la chaîne d'énergie de l'index

III.B.1) Modélisation de la chaîne cinématique de transmission

Q 9. Calcul des énergies cinétiques :

$$E_c(1/0) = \frac{1}{2} M_1 \underbrace{\vec{V}_{G_1}^2(1/0)}_{\vec{0}} + \frac{1}{2} \underbrace{\vec{\sigma}_{G_1}(1/0)}_{I(G_1,1)\vec{\Omega}(1/0)} \vec{\Omega}(1/0)$$

$$E_c(1/0) = \frac{1}{2} C_1 \dot{\theta}_1^2$$

$$E_c(3/0) = \frac{1}{2} M_3 \vec{V}_{G_3}^2(1/0) + \frac{1}{2} \underbrace{\vec{\sigma}_{G_3}(3/0)}_{I(G_3,3)\vec{\Omega}(3/0)} \vec{\Omega}(3/0)$$

Or

$$\vec{\Omega}(3/0)$$

$$\vec{V}_{G_3}(1/0) = \frac{d}{dt}(\overrightarrow{DG_3}) = \dot{\theta}_3(-b_3\vec{x}_3 + a_3\vec{y}_3)$$

Donc

$$E_c(3/0) = \frac{1}{2} M_3 \dot{\theta}_3^2 (a_3^2 + b_3^2) + \frac{1}{2} C_3 \dot{\theta}_3^2$$

Q 10. Reprenons un graphe des liaisons

Les liaisons sont parfaites donc les puissances galiléennes intérieures sont nulles

$$P_{int} = 0$$

Les liaisons 0 - 1; 0 - 4 et 0 - 3 sont parfaites et liées au bâti donc la puissance galiléenne de leur efforts est nulle.

$$P_{0 \rightarrow 1} = P_{0 \rightarrow 4} = P_{0 \rightarrow 3} = 0$$

La puissance galiléenne développée par le moteur est

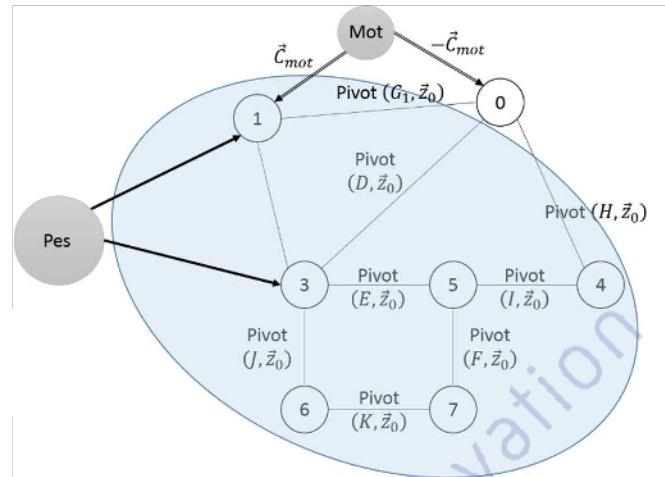
$$P_{mot \rightarrow 1} = C_{mot} \dot{\theta}_1$$

La puissance galiléenne des actions de pesanteur est nulle car elles ne travaillent pas.

$$P_{pes \rightarrow 1} = 0 ; P_{pes \rightarrow 3} = 0$$

Le TEC appliqué au système S donne donc

$$C_1 \dot{\theta}_1 \ddot{\theta}_1 + [M_3(a_3^2 + b_3^2) + C_3] \dot{\theta}_3 \ddot{\theta}_3 = C_{mot} \dot{\theta}_1$$

**III.B.2) Modélisation de l'actionneur**

Q 11. En appliquant la loi des mailles sur le circuit a , il vient

$$u_a - u_{Ra}(t) - u_{La}(t) + e_a(t) = 0$$

Comme

$$u_{Ra}(t) = R_a i_a(t) ; u_{La}(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} ; e_a(t) = -\frac{d\Phi_a}{dt}$$

Il vient

$$u_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} - K_m \dot{\theta}_1 \sin(N\theta_1)$$

On fait de même pour le circuit b

$$u_b(t) = R_b i_b(t) + L_b \frac{di_b(t)}{dt} + K_m \dot{\theta}_1 \cos(N\theta_1)$$

Q 12. Les puissances électriques instantanées absorbées par les phases a et b sont respectivement

$$p_a(t) = u_a(t) i_a(t) ; p_b(t) = u_b(t) i_b(t)$$

La puissance électrique instantanée totale absorbée par l'actionneur s'écrit sous la forme :

$$p_{mpp}(t) = p_a(t) + p_b(t)$$

$$p_{mpp}(t) = R_a i_a^2(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} i_a(t) - K_m \dot{\theta}_1 \sin(N\theta_1) i_a(t) + R_b i_b^2(t) + L_b \frac{di_b(t)}{dt} i_b(t) + K_m \dot{\theta}_1 \cos(N\theta_1) i_b(t)$$

Que l'on peut noter

$$p_{mpp}(t) = p_j(t) + p_{em}(t) + p_{tr}(t)$$

Avec

$$p_j(t) = R_a i_a^2(t) + R_b i_b^2(t)$$

$$p_{em}(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} (L_a i_a^2(t) + L_b i_b^2(t)) \right)$$

$$p_{tr}(t) = K_m \dot{\theta}_1 (\cos(N\theta_1) i_b(t) - \sin(N\theta_1) i_a(t))$$

Q 13. Le couple moteur est alors

$$c_{mot}(t) = \frac{\partial p_{tr}}{\partial \dot{\theta}_1} = K_m (\cos(N\theta_1) i_b(t) - \sin(N\theta_1) i_a(t))$$

Q 14. On a

$$\vec{X} = a(\cos(N\theta_1) \vec{d} - \sin(N\theta_1) \vec{q}) + b(\sin(N\theta_1) \vec{d} + \cos(N\theta_1) \vec{q}) = d\vec{d} + q\vec{q}$$

Soit

$$P(N\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos(N\theta_1) & \sin(N\theta_1) \\ -\sin(N\theta_1) & \cos(N\theta_1) \end{bmatrix}$$

Pour une matrice de rotation, la matrice $P^{-1}(N\theta_1) = {}^T P(N\theta_1)$.

$$P^{-1}(N\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos(N\theta_1) & -\sin(N\theta_1) \\ \sin(N\theta_1) & \cos(N\theta_1) \end{bmatrix}$$

Q 15. Les 2 équations électriques de l'actionneur dans la base fixe $(\vec{a}, \vec{b})$ s'écrivent

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} + L_a \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} + K_m \dot{\theta}_1 \begin{pmatrix} -\sin(N\theta_1) \\ \cos(N\theta_1) \end{pmatrix}$$

En multipliant par $P(N\theta_1)$, il vient

$$P(N\theta_1) \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = R \cdot P(N\theta_1) \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} + L \cdot P(N\theta_1) \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} + K_m \dot{\theta}_1 \cdot P(N\theta_1) \begin{pmatrix} -\sin(N\theta_1) \\ \cos(N\theta_1) \end{pmatrix}$$

Or

$$\begin{aligned} P(N\theta_1) \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} ; P(N\theta_1) \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \\ P(N\theta_1) \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} &= \frac{d}{dt} \left[P(N\theta_1) \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} \right] - \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} \frac{dP(N\theta_1)}{dt} \\ P(N\theta_1) \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} &= \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + N\omega_{mot} \begin{bmatrix} \sin(N\theta_1) & -\cos(N\theta_1) \\ \cos(N\theta_1) & \sin(N\theta_1) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \\ P(N\theta_1) \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} &= \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + N\omega_{mot} \begin{bmatrix} \sin(N\theta_1) & -\cos(N\theta_1) \\ \cos(N\theta_1) & \sin(N\theta_1) \end{bmatrix} P^{-1}(N\theta_1) \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \\ P(N\theta_1) \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} &= \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + N\omega_{mot} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Et

$$P(N\theta_1) \begin{pmatrix} -\sin(N\theta_1) \\ \cos(N\theta_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Ainsi, dans la base tournante $(\vec{d}, \vec{q})$ il vient :

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + N\omega_{mot} \begin{pmatrix} 0 & -L \\ L & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + K_m \omega_{mot} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Q 16. *Bon, là on ne comprend pas bien la question !*

Les pertes par effet joules sont

$$p_J(t) = R_a i_d^2(t) + R_b i_q^2(t)$$

Donc pour minimiser on prend

$$\frac{\partial p_J(t)}{\partial i_d} = 0 \Rightarrow i_d = 0$$

Donc

$$\begin{aligned} u_d &= -NL\omega_{mot} \dot{i}_q \\ u_q &= R i_q + L \frac{di_q}{dt} + K_m \omega_{mot} \end{aligned}$$

Donc on a toujours couplage des tensions mais le système est linéaire.

III.C. – Étude du contrôle en couple de l'actionneur

Q 17. F est un point de fonctionnement donc ses grandeurs vérifient

$$\begin{pmatrix} U_{d0} \\ U_{q0} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} I_{d0} \\ I_{q0} \end{pmatrix} + N\omega_0 \begin{pmatrix} 0 & -L \\ L & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{d0} \\ I_{q0} \end{pmatrix} + K_m \omega_0 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

En supposant des variations $\delta u_d(t)$, $\delta u_q(t)$, $\delta i_d(t)$, $\delta i_q(t)$ autour de F , on peut écrire

$$\begin{pmatrix} U_{d0} + \delta u_d(t) \\ U_{q0} + \delta u_q(t) \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} I_{d0} + \delta i_d(t) \\ I_{q0} + \delta i_q(t) \end{pmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \delta i_d(t) \\ \delta i_q(t) \end{pmatrix} + N\omega_0 \begin{pmatrix} 0 & -L \\ L & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{d0} + \delta i_d(t) \\ I_{q0} + \delta i_q(t) \end{pmatrix} + K_m \omega_0 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Par soustraction des deux systèmes, on obtient

$$\begin{aligned}\delta u_d(t) &= R\delta i_d(t) + L \frac{d\delta i_d(t)}{dt} - N\omega_0 \delta i_q(t) \\ \delta u_q(t) &= R\delta i_q(t) + L \frac{d\delta i_q(t)}{dt} - N\omega_0 \delta i_d(t)\end{aligned}$$

Q 18. Par transformée de Laplace des équations précédentes,

$$\begin{aligned}U_d(p) &= (R + Lp)I_d(p) - N\omega_0 I_q(p) \\ U_q(p) &= (R + Lp)I_q(p) + N\omega_0 I_d(p)\end{aligned}$$

En prenant $U_d(p) = 0$, on obtient

$$U_q(p) = (R + Lp)I_q(p) + N\omega_0 I_d(p) = (R + Lp)I_q(p) + \frac{(N\omega_0)^2}{(R + Lp)} I_q(p)$$

$$\left. \frac{I_q(p)}{U_q(p)} \right|_{U_d(p)=0} = \frac{(R + Lp)}{(R + Lp)^2 + (N\omega_0)^2}$$

Q 19. On veut une erreur statique nulle ce qui conduit à ajouter un intégrateur dans la BO. Mais la marge de phase élevée conduit à limiter son influence aux basses fréquences d'où l'utilisation d'un correcteur PI.

Q 20. Le minimal me pose problème ...

La marge de phase du système est $M\varphi = 120^\circ$

La marge de phase minimale atteignable par le système ... par variation du gain ... est de $M\varphi = 90^\circ$

Q 21. La question est mal posée, on veut 75° à la même pulsation de coupure que sans correction c'est-à-dire $\omega_{0dB} \approx 1,2 \cdot 10^3 \text{ rad.s}^{-1}$, sinon, on ne peut pas résoudre !

A cette pulsation on veut donc une phase corrigée

$$\varphi_{cor} = 75^\circ - 180^\circ = -105^\circ$$

Soit

$$\begin{aligned}\varphi_{cor} &= \varphi_{Ncor} + \varphi(C_q) \approx -60^\circ - 90^\circ + \arctan(T_{iq}\omega_{0dB}) = -105^\circ \\ \arctan(T_{iq}\omega_{0dB}) &\approx 45^\circ\end{aligned}$$

Ce qui conduit à

$$T_{iq} \approx \frac{1}{\omega_{0dB}} \approx 0,8 \text{ ms}$$

Q 22. Pour avoir une marge de phase de 90° , la pulsation de coupure à $0dB$ doit être effectivement $\omega_{0dB} \approx 1,2 \cdot 10^3 \text{ rad.s}^{-1}$. Ce qui conduit à baisser la courbe de $3dB$ donc

$$K_{iq} \approx 0,7 \text{ V.A}^{-1}$$

Remarque : pour $K_{iq} = 1 \text{ V.A}^{-1}$, on a une marge de phase de 83° . Est-il bien nécessaire de la modifier ??

Q 23. Pour le point de fonctionnement F .

- L'erreur statique est nulle
- Le temps de réponse à 5% est de l'ordre de 10 ms donc inférieure à 13 ms.
- Il n'y a pas de dépassement
- La marge de gain est infinie et la marge de phase est de 90°

Les critères du cahier des charges sont vérifiés

Q 24. Le système étant à retour unitaire, FTBF s'écrit

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} = \frac{K(1 + T_1p)}{p(1 + T_2p) + K(1 + T_1p)} = \frac{(1 + T_1p)}{1 + \frac{(KT_1 + 1)}{K}p + \frac{T_2}{K}p^2}$$

C'est la réponse d'un second ordre à un échelon + une impulsion.

Le second ordre a une pulsation propre du système non amorti

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{T_2}}$$

Et un coefficient d'amortissement

$$z = \frac{1}{2} \frac{(KT_1 + 1)}{K} \sqrt{\frac{K}{T_2}}$$

Application numérique :

$$z = 0,72$$

Le système présente donc un dépassement pour la réponse indicielle, dépassement augmenté par la réponse impulsionnelle, ce qui ne valide pas le critère du cahier des charges

Q 25. Les critères de dépassement et d'erreur en régime permanent sont vérifiés à ΔI près du fait du correcteur. Ce qui permet de contrôler ce dépassement.

Le temps de réponse à 5% est lui très faible, de l'ordre de 0,5 ms.

IV. Étude d'une évolution fonctionnelle de la prothèse myoélectrique

Q 26. Par transformée de Laplace inverse du correcteur, en supposant les conditions initiales nulles, on a

$$T_p \frac{di_{qcons}(t)}{dt} = K_p \varepsilon_\theta(t) + K_p T_p \frac{d\varepsilon_\theta(t)}{dt}$$

Q 27. Le développement de Taylor à l'ordre un donne

$$i_{qcons}(t - T_e) = i_{qcons}(t) - T_e \frac{di_{qcons}(t)}{dt}$$

De même

$$\varepsilon_\theta(t - T_e) = \varepsilon_\theta(t) - T_e \frac{d\varepsilon_\theta(t)}{dt}$$

Ainsi

$$\frac{di_{qcons}(t)}{dt} = \frac{1}{T_e} [i_{qcons}(t) - i_{qcons}(t - T_e)]$$

Et

$$\frac{d\varepsilon_\theta(t)}{dt} = \frac{1}{T_e} [\varepsilon_\theta(t) - \varepsilon_\theta(t - T_e)]$$

L'équation différentielle s'écrit, pour $t = nT_e$

$$T_p \frac{di_{qcons}(nT_e)}{dt} = K_p \varepsilon_\theta(nT_e) + K_p T_p \frac{d\varepsilon_\theta(nT_e)}{dt}$$

D'où la relation de récurrence

$$\frac{T_p}{T_e} [i_{qcons}(nT_e) - i_{qcons}((n-1)T_e)] = K_p \varepsilon_\theta(nT_e) + \frac{K_p T_p}{T_e} [\varepsilon_\theta(nT_e) - \varepsilon_\theta((n-1)T_e)]$$

Ou encore

$$i_{qcons}(nT_e) = i_{qcons}((n-1)T_e) + \left(\frac{T_e}{T_p} + 1\right) K_p \varepsilon_\theta(nT_e) - K_p \varepsilon_\theta((n-1)T_e)$$

Donc

$$A = 1 ; B = \left(\frac{T_e}{T_p} + 1\right) K_p ; C = -K_p$$

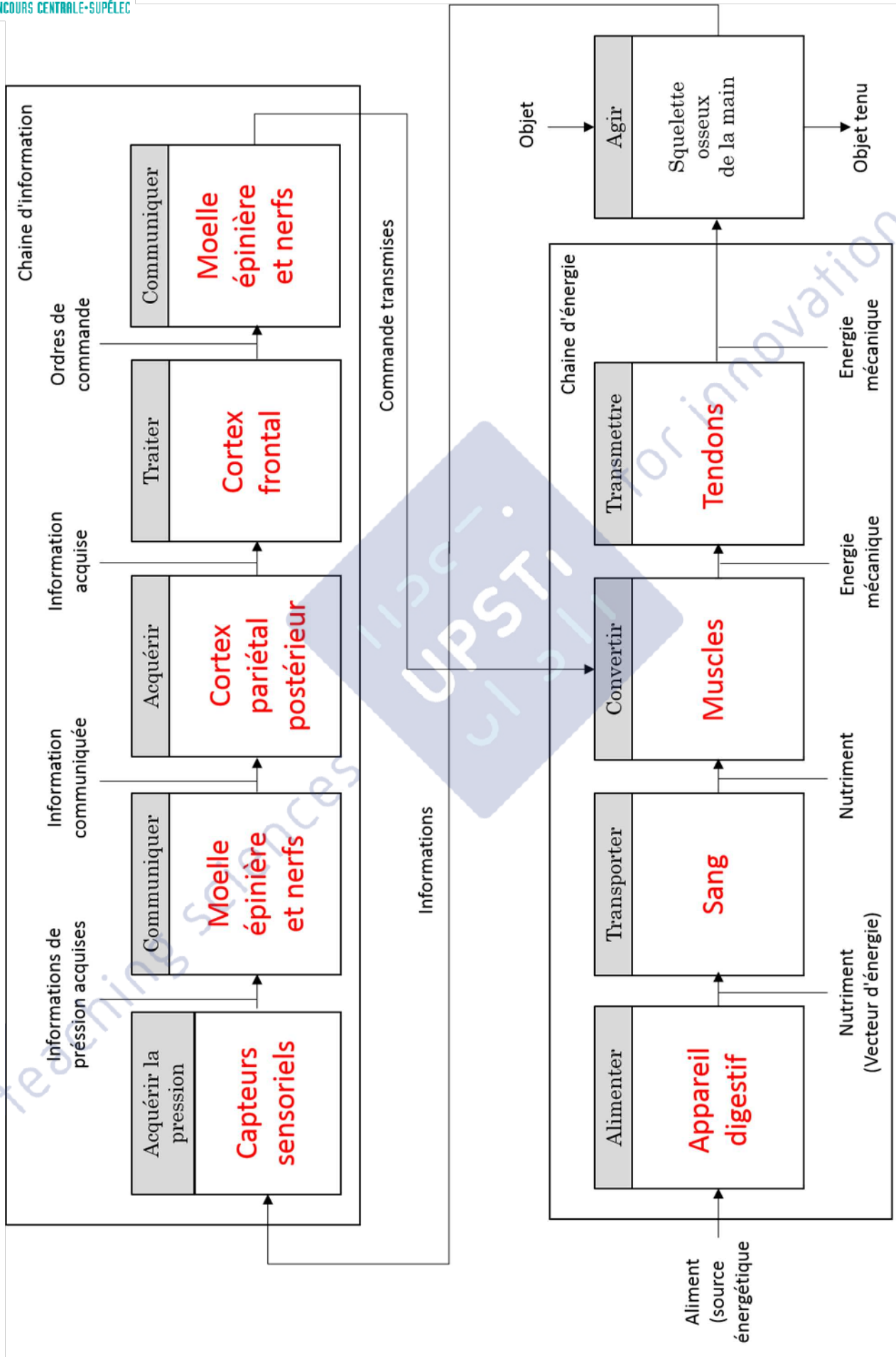
Q 28. Cf DR5.

V. Synthèse

Q 29. C'est quoi cette question ?

• • • FIN • • •

DR1 : chaîne d'énergie - chaîne d'information



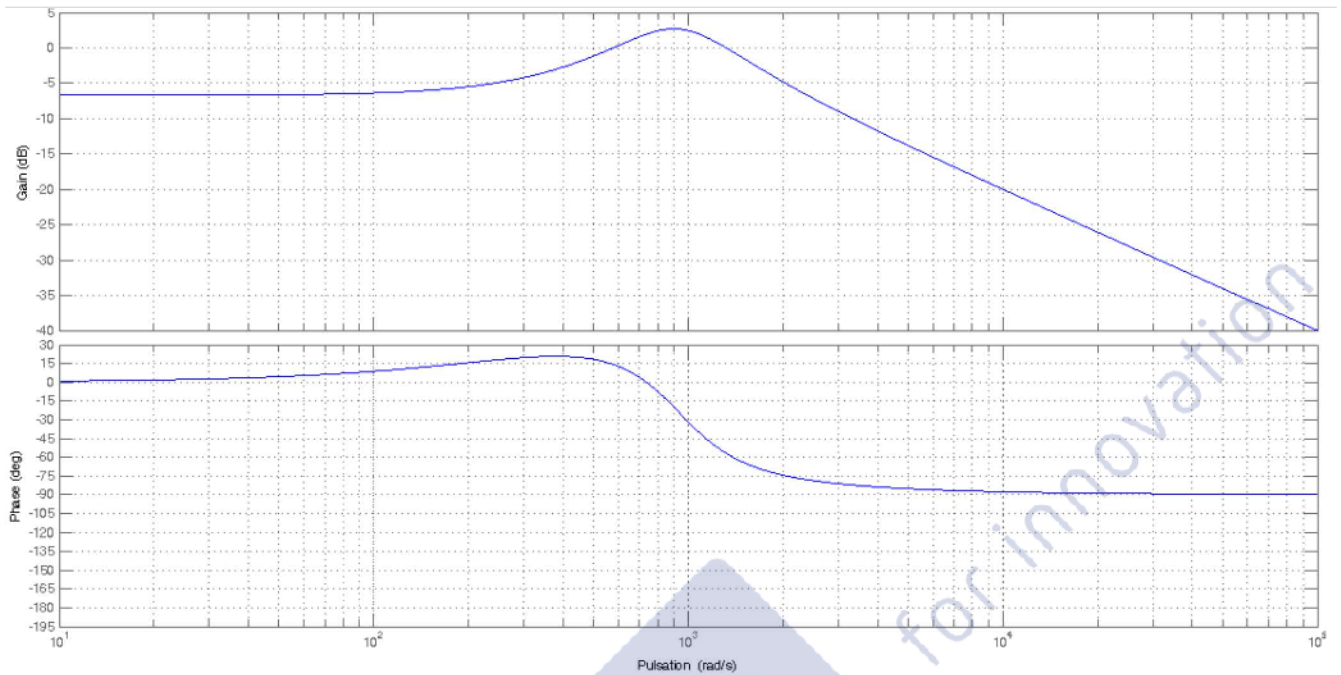
DR2 : validation de la capacité de la prothèse à maintenir en équilibre les verres

	Diamètre	Masse à vide	Contenance	Poids total	Effort normal nécessaire au maintien du verre	Effort normal développé par un doigt	Conclusion
Unité	mm	g	cl	N	N	N	
Verre 1	48	175	33	$P = (175 + 330)g = 4,95$	$F_n = \frac{P}{f} = 8,26$	80	OK
Verre 2	61	310	32	$P = (310 + 320)g = 6,18$	$F_n = \frac{P}{f} = 10,30$	70	OK
Verre 3	76	340	42	$P = (340 + 420)g = 7,46$	$F_n = \frac{P}{f} = 12,43$	63	OK
Verre 4	94	200	52	$P = (200 + 520)g = 7,06$	$F_n = \frac{P}{f} = 11,77$	60	OK
Gobelet plastique	42	3,3	20	$P = (3,3 + 200)g = 1,99$	$F_n = \frac{P}{f} = 3,32$	85	OK

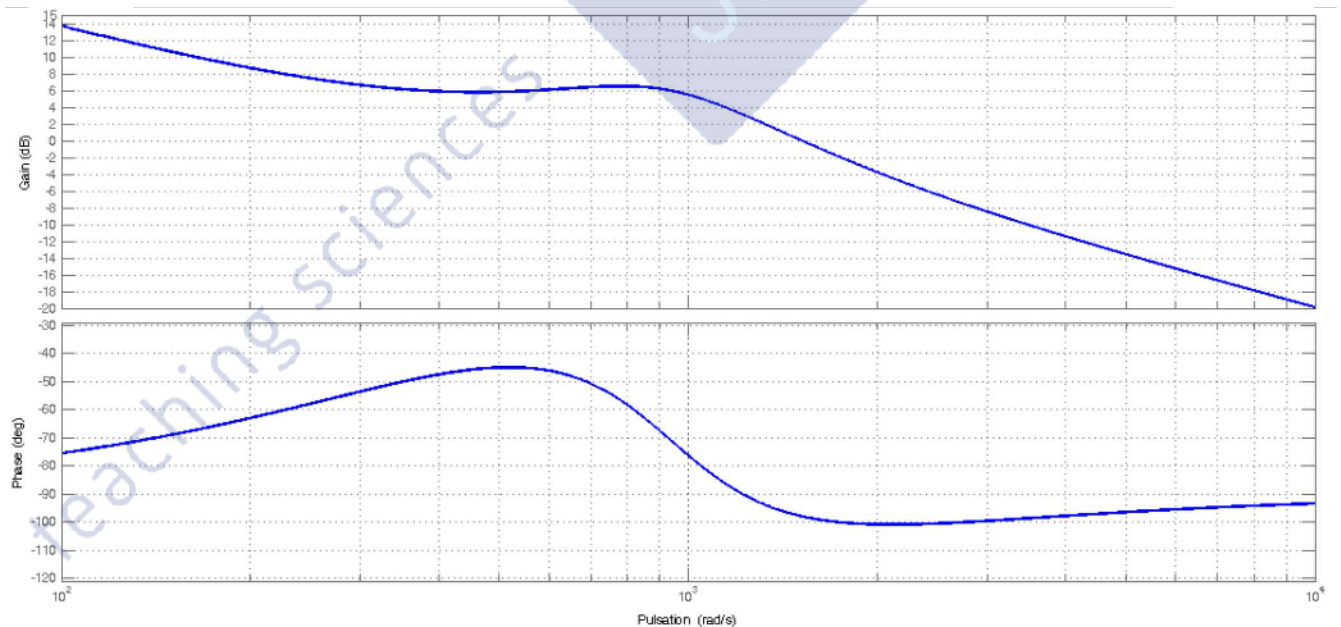
Conclusion

L'effort est suffisant pour maintenir en équilibre tous les verres.

DR3 : diagramme de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte de l'axe q pour $C_q(p) = 1$ et $\omega_{mot} = 70 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$



DR4 : diagramme de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte de l'axe q pour $\omega_{mot} = 70 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $K_{iq} = 1 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1}$ et $T_{iq} = 1 \text{ ms}$



DR5 : algorithme de description de la réalisation du correcteur $C_{pos}(p)$

Remarques :

- Les constantes A , B et C sont définies dans un autre algorithme appelé avant celui du correcteur de position.
- La valeur de θ_{1cons} est élaborée par un autre algorithme appelé avant celui du correcteur de position.
- On note $\varepsilon_{\theta old}$ et $i_{qcons old}$, respectivement la valeur de $\varepsilon_{\theta}(t)$ et $i_{qcons}(t)$ à l'instant $(n - 1) \cdot T_e$.
- On note θ_{mes} , $\varepsilon_{\theta new}$ et $i_{qcons new}$, respectivement la valeur de la position angulaire $\theta_1(t)$, la valeur de $\varepsilon_{\theta}(t)$ et $i_{qcons}(t)$ à l'instant $n \cdot T_e$

