

DS N°3

Aucun document autorisé
Calculatrices non autorisées
Durée 4 heures

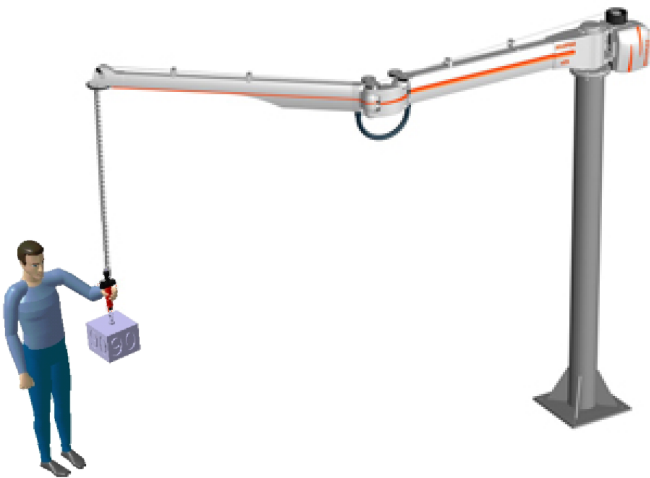
Le devoir comporte 2 problèmes extraits de sujet de concours

Problème N°1 : Mines MP 2025 – Goniomètre piézoélectrique – temps conseillé 2h45

Problème N°2 : extrait Centrale MP 2016 – Bras collaboratif ZE Solution – temps conseillé 1h15

Problème N°2 : Bras collaboratif ZE Solution (court extrait Centrale MP 2016)

Dans le contexte industriel actuel, il existe encore un grand nombre de tâches pénibles qui ne peuvent pas être automatisées et où le geste humain reste indispensable. L'introduction d'une assistance robotique peut alors être envisagée pour réduire les efforts que l'opérateur doit fournir et ainsi éviter l'occurrence de troubles musculosquelettiques. Le bras collaboratif de l'entreprise Sapelem, nommé ZE Solution, permet de manipuler intuitivement différents types de charges allant jusqu'à 200 kg « sans effort ». Afin de respecter la confidentialité de ce système, les données et résultats présentés dans ce sujet sont approchés et limitatifs par rapport à la solution industrielle réelle.



Photos du bras manipulateur collaboratif sapelem et d'un environnement de manutention

Principe de fonctionnement

La volonté de déplacement vertical de la charge suspendue en bout de câble est détectée par un capteur d'effort placé dans la pognée dite « collaborative » tenue par l'opérateur. Cet effort est converti en une consigne de vitesse angulaire imposée à une boucle d'asservissement d'un moteur à courant continu « brushless ». Celui-ci entraîne en rotation, via un réducteur, un tambour (cylindrique) autour duquel s'enroule sans glisser, le câble de levage (cf figure 1). Une poulie de renvoi permet alors le mouvement vertical de la charge indépendamment de sa valeur (jusqu'à 200kg).

Étude de l'asservissement de vitesse de la chaîne de motorisation asservie

Objectif : Déterminer les paramètres du correcteur de la boucle de vitesse pour respecter le cahier des charges de l'asservissement de vitesse de la chaîne de motorisation asservie donné dans le tableau ci-dessous.

Stabilité	Marge de phase	$M_\varphi = 80^\circ$
Précision	Écart en régime permanent vis-à-vis d'une entrée en échelon	Nul
	Écart en régime permanent vis-à-vis de la perturbation (B) constante	Nul
Rapidité	Pulsation de coupure à 0 dB de la fonction de transfert en boucle ouverte	$\omega_{0dB} = 40 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$

Tableau 1 : extrait du cahier des charges de la boucle d'asservissement du moteur

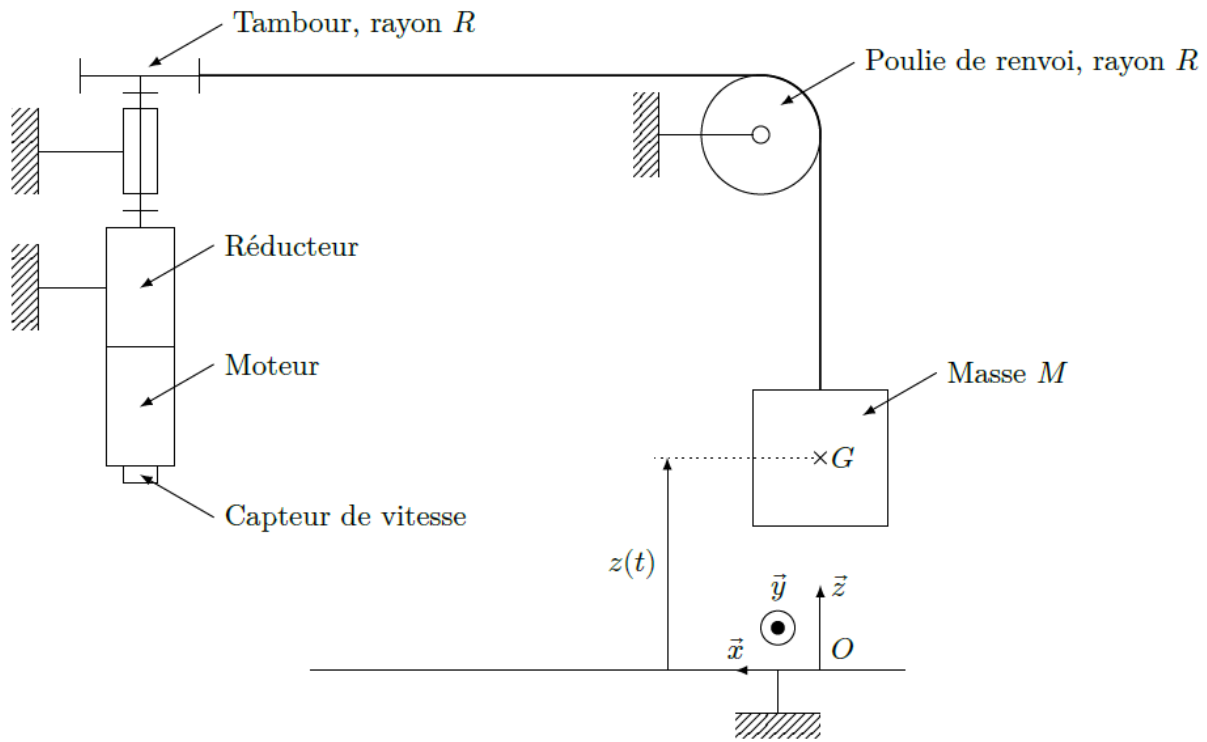


Figure 1 : Schéma de principe du mécanisme de déplacement vertical

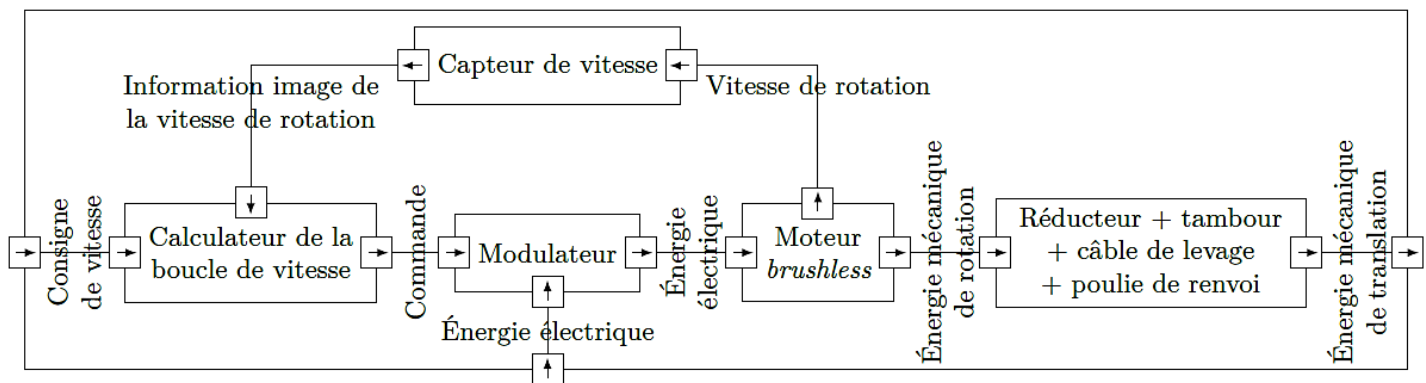


Figure 2 : Diagramme de bloc interne de la chaîne de motorisation

Caractéristiques des constituants de la chaîne fonctionnelle du mécanisme de déplacement vertical

Le schéma-blocs de la chaîne de motorisation asservie est présenté sur la figure 3.

- Le calculateur de la boucle de vitesse génère la consigne de courant d'intensité $i_c(t)$ à imposer au moteur (à courant continu brushless) en comparant la vitesse angulaire de consigne à la vitesse angulaire réelle mesurée par un capteur de vitesse placée sur l'arbre moteur.
- La boucle interne de courant du moteur brushless est considérée parfaite et, en conséquence, est modélisée par un gain pur unitaire, comme indiquée dans le document réponses.
- Le couple $C_m(t)$ fourni par le moteur brushless au réducteur vérifie la relation $C_m(t) = K_m i(t)$.

Paramétrage cinématique

Grandeur	Notation	Valeur
Vitesse angulaire du moteur	$\omega_m(t)\vec{z}$	
Vitesse angulaire du tambour	$\omega_T(t)\vec{z}$	
Rayon du tambour et de la poulie de renvoi	R	$R = 0,05\text{ m}$
Rapport de réduction du réducteur	$\frac{1}{\rho} = \frac{\omega_T(t)}{\omega_m(t)}$	$\rho = 15$
Vitesse linéaire de la masse en translation	$v(t)\vec{z} = \dot{z}(t)\vec{z}$	

Paramétrage des masses et inerties

Grandeur	Notation	Valeur
Masse entraînée	M de centre de gravité G	$M \leq 200\text{ kg}$
Inertie du moto-réducteur autour de son axe de rotation, rapportée sur l'axe du moteur <i>brushless</i>	J_0	$J_0 = 0,00315\text{ kg}\cdot\text{m}^2$
Masses du rotor et des éléments mobiles du réducteur		Négligées
Câble de levage		Masse et inertie négligées Câble inextensible
Poulie de renvoi		Masse et inertie négligées
Tambour		Masse et inertie négligées

Paramétrage des actions mécaniques

Grandeur	Notation	Valeur
Couple imposé par le stator du moteur <i>brushless</i> sur le rotor	$C_m(t)\vec{z}$	
Rendement du réducteur		1
Accélération de la pesanteur	$-g\vec{z}$	$g = 9,81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Tableaux 2, 3 et 4 : Ensemble des caractéristiques

Dans le cadre des hypothèses retenues, on pose $v(t) = K_{rigide} \omega_m(t)$ avec $K_{rigide} > 0$ par convention.

- Question 1. Déterminer l'expression littérale et la valeur numérique de K_{rigide} .
- Question 2. Par application du théorème de l'énergie cinétique, montrer que l'équation de mouvement s'écrit :
$$A \frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - B$$
 et expliciter Les constantes A et B en fonction de M , g , J_0 et K_{rigide} (on supposera les liaisons mécaniques parfaites).

On note $\omega_{mc}(t)$ la vitesse angulaire de consigne et $C_v(p)$ la fonction de transfert du correcteur de la boucle de vitesse.

- Question 3. Reproduire et compléter le schéma-blocs figure 3 ci-dessous (dans le domaine de Laplace) en fonction des paramètres ρ , R , K_m et A . Les conditions initiales sont supposées nulles.

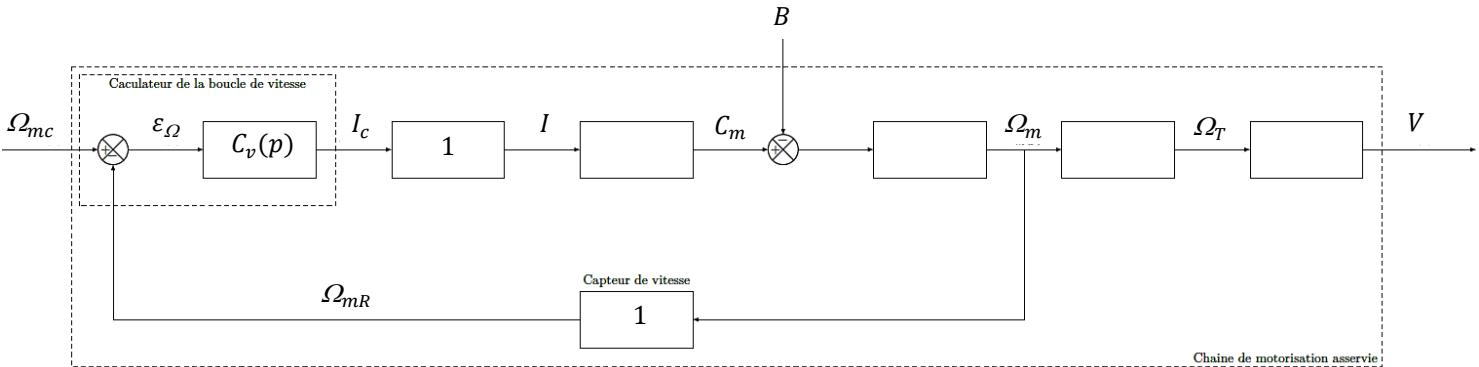


Figure 3 : Schéma blocs

Pour une charge à déplacer de $M = 100 \text{ kg}$, la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée (c'est-à-dire en considérant $C_v(p) = 1$ vaut numériquement : $FTBO_{nc}(p) = \frac{\Omega_{mR}(p)}{\varepsilon_{\Omega}(p)} = \frac{K_{BO}}{p}$ avec $K_{BO} = 218$.

Question 4. Déterminer la marge de phase $M\phi$. Est-ce satisfaisant vis-à-vis du critère de stabilité du cahier des charges ?

Le constructeur choisit un correcteur de type Proportionnel Intégral : $C_v(p) = K_i \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right)$.

Question 5. Quelle performance du cahier des charges justifie l'utilisation de ce type de correcteur ? Tracer l'allure du diagramme de Bode asymptotique du correcteur $C_v(p)$ en précisant les points caractéristiques en fonction de K_i et T_i .

La constante de temps du correcteur T_i vaut 0,15 s. Les diagrammes de Bode du système ainsi corrigé sont alors donnés sur la figure 4 (un zoom est fourni figure 4bis)).

Question 6. Justifier la valeur numérique de T_i choisie vis-à-vis de l'exigence de rapidité du cahier des charges (on donne $\tan(80^\circ) \approx 6$).

Question 7. En utilisant les figures 4 et 4bis, en déduire alors l'expression numérique de K_i permettant de satisfaire l'ensemble des performances attendues dans le cahier des charges.

Figure 4 : Diagrammes de Bode du système corrigé avec $K_i = 1$

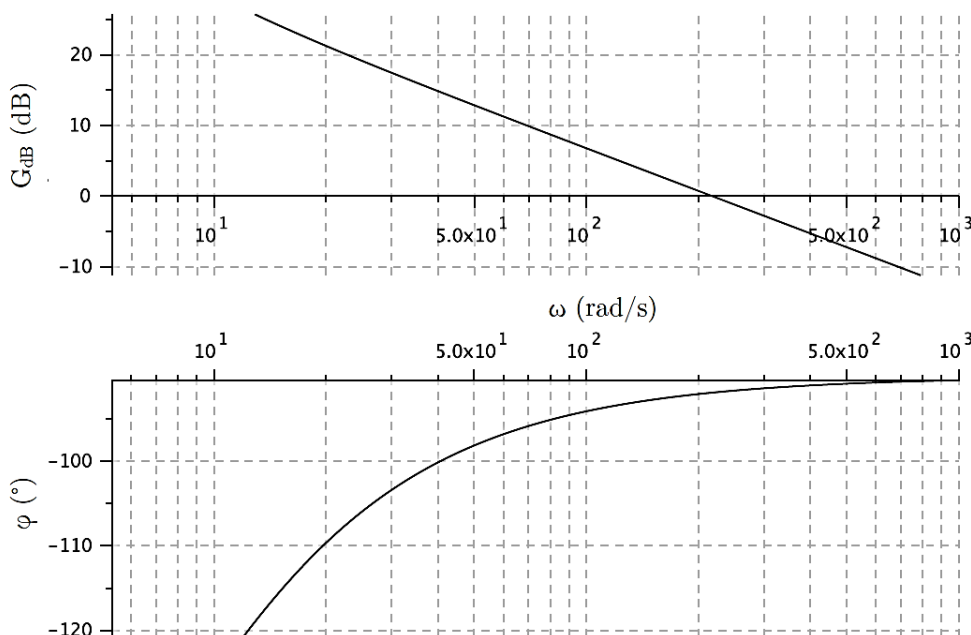
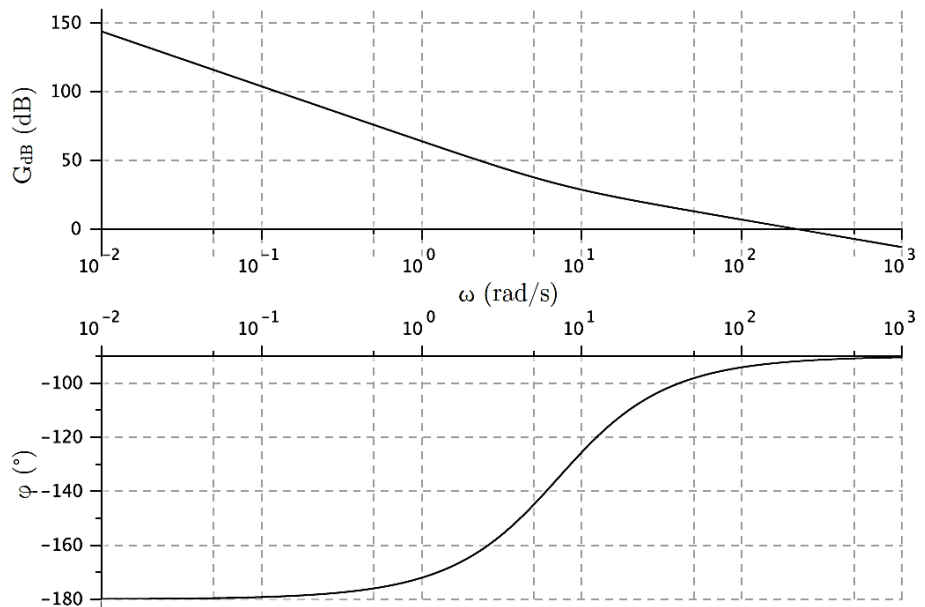


Figure 4bis : Diagrammes de Bode du système corrigé avec $K_i = 1$ (Zoom)