

MP, DS de SI

Jeudi 9 février 2023

Durée : 2h

Corrigé prochainement sur le site :
<http://perso.numericable.fr/starnaud/>

Ce DS comporte :

- ✓ Un sujet, pages 2 à 4 puis 9 à 16.
- ✓ Un diagramme des exigences (document D5).
- ✓ Un document réponse, 2 pages, pour les questions 11, 16, 21, 22 et 24.

Remarques :

- ✓ Traiter en priorité la partie 2 (asservissement).
- ✓ La partie 3 (TEC) sera plutôt traitée ultérieurement.
- ✓ Les parties 1 et 4 se sont pas à traiter et ne sont pas données.

Systeme de télé-échographie

Présentation

1. Mise en situation

L'échographie est une technique d'imagerie médicale basée sur l'exploitation de la réflexion d'une onde ultrasonore au niveau des interfaces physiologiques entre organes. Non irradiante, peu coûteuse et mobile, elle représente l'examen d'imagerie médicale le plus pratiqué au monde. En contrepartie, sa réalisation nécessite un manipulateur expert en imagerie médicale, capable d'analyser les images échographiques en temps réel afin d'orienter la sonde en conséquence. L'analyse et l'expertise sont donc réalisées pendant l'examen. De ce fait, cette technique d'imagerie est qualifiée de "manipulateur dépendant" : sa mise en œuvre est difficilement envisageable sur des sites isolés.

La robotisation de cette technique permet toutefois d'en élargir le champ d'application. Grâce à la télé-échographie robotisée (**figure 1**), il devient possible de réaliser une échographie sur un patient situé sur un site isolé (appelé site patient), alors même que le spécialiste en imagerie médicale se trouve sur un site distant de celui où est pratiqué l'examen (appelé site expert).



Figure 1 - Principe de la télé-échographie

Sur le site patient (**figure 1a**) équipé du robot porte-sonde, d'un échographe et d'un système de visioconférence, un professionnel de santé est chargé de positionner le robot porte-sonde sur le patient et de le maintenir au cours de l'examen. Depuis le site expert distant (**figure 1b**), le médecin dirige l'examen échographique. En manipulant une sonde fictive, il donne une consigne de position pour la sonde, que le robot exécute au contact du patient. Réalisant le lien entre les deux sites, le réseau de communication (ISDN, 4G, satellite...) permet en temps réel, le contrôle du robot, la visioconférence ainsi que la transmission des images échographiques.

2. Analyse système partielle

Le diagramme d'exigences (**D5** du **document réponse**), présente un extrait du cahier des charges du système de télé-échographie.

La **figure 2** décrit le robot porte-sonde constitué :

- d'une structure porteuse **0** ;
- d'un module de rotation, composé des sous-ensembles **1, 2, 3**, permettant d'orienter la sonde en lui imposant trois rotations (R_1, R_2, R_3) suivant les axes 1 à 3 ;
- du porte-sonde **4** sur lequel est fixé la sonde échographique **S**. La translation T suivant l'axe 4 permet de contrôler l'effort de contact sonde/peau du patient.

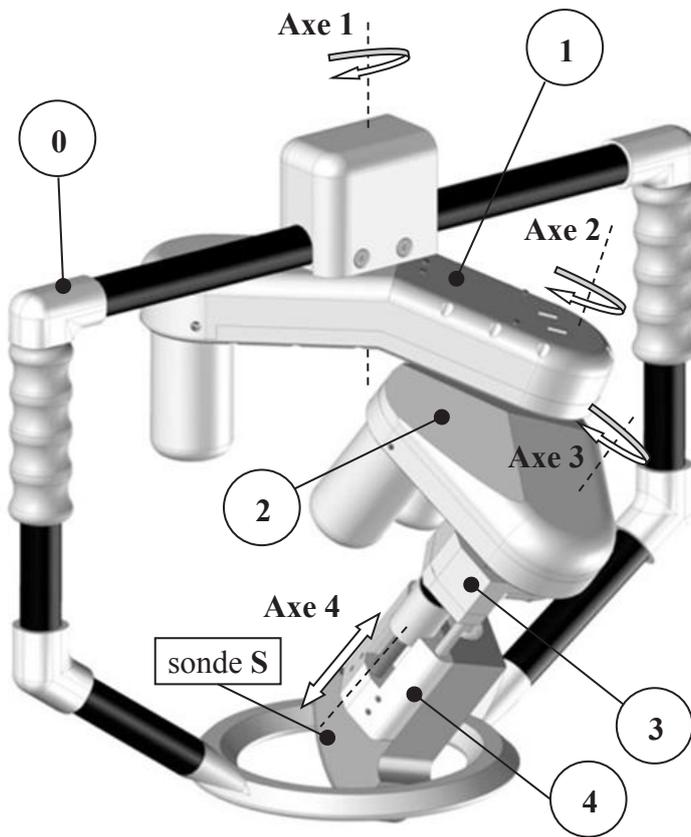


Figure 2 - Robot porte-sonde

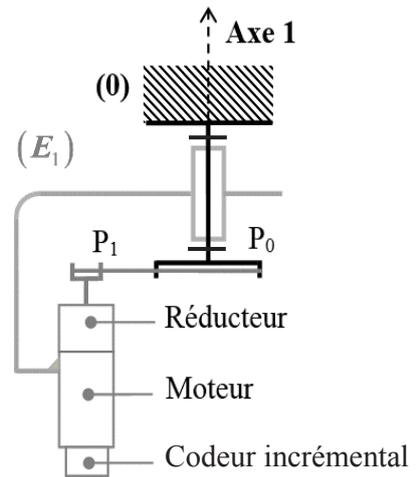


Figure 3 - Chaîne cinématique associée à l'axe 1

Réducteur (R)	Rapport de réduction $r = 1/30,7$
Poulie P ₀	Diamètre D ₀ = 42 mm
Poulie P ₁	Diamètre D ₁ = 13 mm

Tableau 1 - Caractéristiques de la transmission

On nomme E_1 l'ensemble {1, 2, 3, 4}.

La chaîne fonctionnelle assurant la rotation R_1 de l'ensemble E_1 autour de l'axe 1 est décrite par le schéma cinématique de la figure 3 et le diagramme de blocs internes de la figure 4.

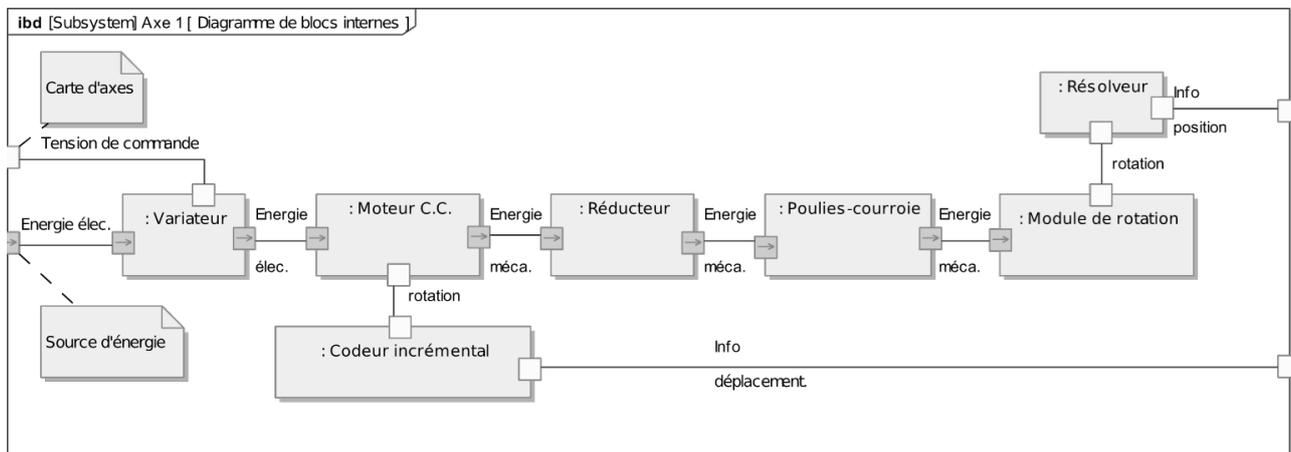


Figure 4 - Diagramme de blocs internes de l'axe 1

3. Problème posé

Afin que le praticien soit en mesure d'obtenir une image échographique d'intérêt, le système de télé-échographie doit lui permettre d'orienter la sonde de manière à trouver la meilleure incidence entre le plan ultrasonore et la partie de l'organe examinée. La qualité du positionnement de la sonde sur le patient qui conditionne l'obtention d'images d'intérêt nécessite de maîtriser notamment :

- le mouvement imposé à la sonde par le robot porte-sonde ;
- la commande, depuis un site distant, des différents axes du robot porte-sonde.

L'objectif de cette étude est de vérifier certaines performances du système afin de valider partiellement le respect des exigences liées au positionnement de la sonde échographique.

4. Démarche proposée

Le respect des exigences 1.1 relatives au déplacement de la sonde fait l'objet de la **Partie I**. Celle-ci a pour objectif de vérifier que la structure mécanique retenue est compatible avec les exigences liées au mouvement à imposer à la sonde (exigence 1.1.1) et à l'espace de travail attendu (exigence 1.1.2). La spécification de certaines de ces exigences, à partir d'une analyse du geste médical, fait par ailleurs l'objet de la **Partie IV**.

Le respect des exigences 1.2 relatives à la commande du robot porte-sonde est abordé à travers les points suivants :

- prévision des performances et synthèse de la commande du premier axe du robot, en vitesse (exigence 1.2.1.1) et en position (exigence 1.2.1.2) , objet de la **Partie II** ;
- mise en place d'une commande synchronisée entre les différents axes (exigence 1.2.1.3) et validation des performances de la commande distante depuis le site expert (exigence 1.2.3), objet de la **Partie V**.

La **Partie III** aborde la problématique du dimensionnement du moteur associé à l'axe 1.

~~Partie I – Validation des performances cinématiques du robot porte-sonde~~

~~**Objectif** : vérifier que les différentes exigences 1.1 relatives au déplacement de la sonde peuvent être satisfaites.~~

~~Modélisation cinématique du robot porte-sonde~~

~~Le schéma cinématique du robot porte-sonde et le paramétrage associé sont donnés dans les figures 5 et 6.~~

~~I.1 – Validation de l'exigence " Nature du mouvement " (exigence 1.1.1)~~

~~**Objectif** : vérifier que l'architecture du robot porte-sonde est compatible avec la nature du mouvement attendu.~~

~~Afin de trouver la meilleure incidence entre le plan ultrasonore et la partie de l'organe examinée, et pour obtenir une image d'échographie contenant les informations qu'ils cherchent, les praticiens imposent à la sonde un déplacement sphérique autour du point de contact O , soit une composition de trois rotations. C'est donc naturellement le mouvement attendu lors de la manipulation de la sonde par le robot. Pour la suite de l'étude, on considère que dans sa position initiale, la sonde est en contact avec le patient. Sur le schéma cinématique de la figure 5, le point O_s , extrémité de la sonde, est alors confondu avec le point O , origine du repère lié au patient.~~

~~Le torseur cinématique associé au mouvement relatif du solide j par rapport au solide i noté $\{v_{j/i}\}$ est défini par ses éléments de réduction suivant :~~

$$\{v_{j/i}\} = \left\{ \begin{array}{c} \overline{\Omega}_{j/i} \\ \overline{V}_{j/i}(P) \end{array} \right\}_P .$$

Partie II - Commande en position du robot porte-sonde

Objectif : vérifier que les différentes exigences 1.2 relatives à la commande en position du robot porte-sonde peuvent être satisfaites.

II.1 - Principe de la commande du robot porte-sonde

La commande du robot porte-sonde repose sur la mise en œuvre de deux couches matérielles et logicielles qui communiquent l'une avec l'autre (**figure 12**).

- Le *contrôleur haut niveau*, implémenté sur le PC de contrôle du poste patient, reçoit en paramètres d'entrée, les coordonnées du positionnement désiré pour la sonde échographique, dans l'espace de travail (précession ψ , nutation θ , rotation propre ϕ) ainsi que les positions articulaires $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ acquises par le contrôle bas-niveau. L'ensemble de ces données est traité numériquement (calcul des modèles géométriques direct et inverse du robot, prise en compte des butées articulaires, des changements d'aspect et le traitement des singularités) afin de déterminer les consignes articulaires à transmettre au contrôleur bas niveau.
- Le *contrôleur bas niveau*, implémenté sur la carte d'axes, reçoit les consignes articulaires et calcule les profils de vitesse $(\omega_1(t), \omega_2(t), \omega_3(t))$ transmis ensuite aux variateurs de vitesse qui pilotent les moteurs des différents axes du robot. Il assure également l'acquisition des positions articulaires qui sont communiquées au contrôleur haut niveau.

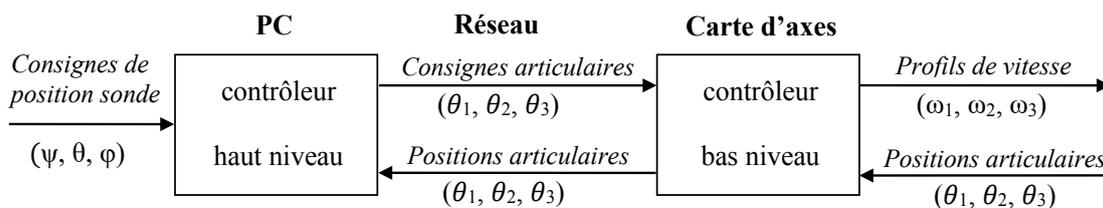


Figure 12 - Principe de la commande du robot porte-sonde

Commande de l'axe 1

On se limite ici à l'étude de la commande du premier axe, dont la structure est présentée en **figure 4**. Le principe associé à cette commande est décrit par la **figure 13**. La structure de commande de la position angulaire θ_1 est composée de deux boucles imbriquées disposant chacune d'un réseau correcteur :

- une boucle interne de vitesse, gérée par le variateur ;
- une boucle externe de position, gérée par la carte d'axes.

Un codeur incrémental, solidaire de l'axe moteur permet après traitement numérique d'obtenir une image de la position angulaire θ_1 et de la vitesse angulaire ω_1 de l'axe 1, grandeurs mises en œuvre au niveau des deux boucles d'asservissement. La consigne de position est élaborée par la carte d'axes, par intégration du profil de vitesse généré.

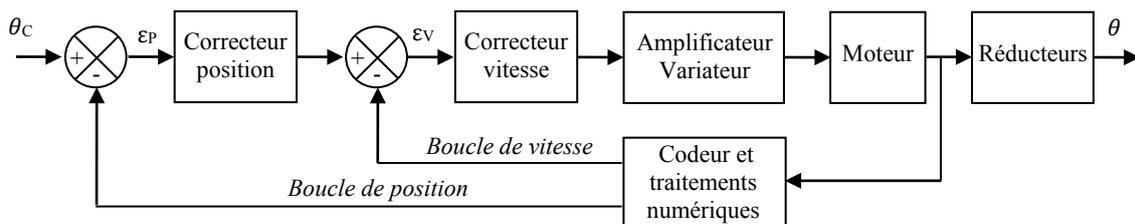


Figure 13 - Structure de l'asservissement d'un axe

II.2 - Modélisation de l'axe 1

Objectif : élaborer un modèle de connaissance de l'axe 1 et réaliser la synthèse de la commande.

Modélisation de la motorisation

La motorisation de l'axe 1 est réalisée à l'aide d'un moteur électrique à courant continu et aimants permanents, dont le comportement peut être modélisé par les équations suivantes :

$$u(t) = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (1) \quad C_m(t) = k_c i(t) \quad (2)$$

$$e(t) = k_e \omega_m(t) \quad (3) \quad C_m(t) - C_{re}(t) = J_{eq} \frac{d\omega_m(t)}{dt} \quad (4)$$

Les différentes grandeurs intervenant dans le modèle sont définies dans le tableau 2 suivant :

Symbole	Désignation	Unités / valeurs
$u(t)$	Tension d'induit	V
$e(t)$	Force contre-électromotrice	V
$i(t)$	Courant d'induit	A
$\omega_m(t)$	Vitesse de rotation du moteur	rad/s
$C_m(t)$	Couple moteur	N·m
$C_{re}(t)$	Couple résistant équivalent ramené sur l'axe moteur	N·m
R	Résistance de l'induit	4,1 Ω
L	Inductance de l'induit	0,18 mH
k_e	Constante de force contre-électromotrice	$1,6 \cdot 10^{-2}$ V/(rad/s)
k_c	Constante de couple	$1,6 \cdot 10^{-2}$ N·m/A
J_{eq}	Inertie équivalente ramenée sur l'axe moteur	$\in [7,2 \cdot 10^{-6}, 8,6 \cdot 10^{-6}]$ kg·m ²

Tableau 2 - Grandeurs associées au modèle de la motorisation

On note $\Omega_m(p)$, $U(p)$, $E(p)$, $I(p)$, $C_m(p)$ et $C_{re}(p)$, les transformées de Laplace respectives de $\omega_m(t)$, $u(t)$, $e(t)$, $i(t)$, $C_m(t)$ et $C_{re}(t)$.

Q11. Déterminer sur la copie les transformées de Laplace des équations (1) à (4) du moteur définies en considérant des conditions initiales nulles. Compléter les blocs correspondants sur le schéma bloc du **Document Réponse DR1** par les transmittances manquantes.

Q12. Déterminer les expressions littérales des fonctions de transfert en suivi de consigne

$$H_1(p) = \left. \frac{\Omega_m(p)}{U(p)} \right|_{C_{re}(p)=0} \quad \text{et en régulation} \quad H_2(p) = \left. \frac{\Omega_m(p)}{C_{re}(p)} \right|_{U(p)=0}, \text{ sous forme canonique.}$$

On pose $\tau_e = \frac{L}{R}$ et $\tau_{em} = \frac{RJ_{eq}}{k_e k_c}$, respectivement constantes de temps électrique et électromécanique du moteur à courant continu.

Q13. Déterminer les valeurs numériques des constantes de temps τ_e et τ_{em} , pour les valeurs extrêmes de J_{eq} . En déduire qu'une constante de temps peut être considérée comme négligeable devant l'autre.

Q14. Montrer, en précisant l'expression de K_m , que la fonction $H_1(p)$ peut alors être approximée

$$\text{par la forme : } H_1(p) \approx \frac{K_m}{(1 + \tau_e p)(1 + \tau_{em} p)}.$$

Modélisation de la boucle de vitesse

La **figure 14** présente la structure de la boucle de vitesse associée à la commande de l'axe 1. Pour une consigne de vitesse de rotation $\omega_c(t)$ [m/s], un convertisseur génère une tension de consigne de rotation à appliquer au moteur $u_{cv}(t)$ [V]. Un traitement numérique de la vitesse relevée sur l'axe du moteur fournit une tension mesurée $u_{mv}(t)$ [V], image de la vitesse de rotation du moteur $\omega_m(t)$. Un correcteur adapte le signal écart entre la tension de consigne et la tension mesurée, ce qui permet après correction et amplification, de définir la tension d'alimentation $u_m(t)$ à appliquer au moteur.

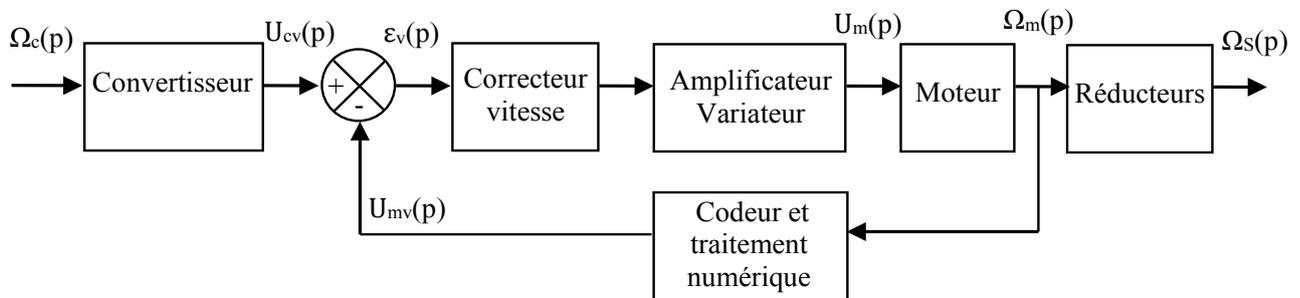


Figure 14 - Asservissement en vitesse d'un axe

Le **tableau 3** liste les gains des différents composants intervenant dans la commande de l'axe 1.

Blocs	Fonctions de transfert
Convertisseur	K_{conv} (à déterminer)
Correcteur vitesse	$C_V(p)$ (réglé par la suite)
Amplificateur/variateur	$K_A = 9,4$
Codeur et traitement	$K_{vit} = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ V}/(\text{rad/s})$
Réducteurs	K_R (à déterminer)

Tableau 3 - Fonctions associées aux blocs du modèle

On rappelle que les caractéristiques de la transmission sont définies dans le **tableau 1**.

Q15. Déterminer les expressions des gains K_R et K_{conv} ainsi que les valeurs numériques et unités associées.

Q16. Compléter le schéma-bloc sur le **DR 1** en y faisant figurer les fonctions de transfert sous forme littérale dans le domaine de Laplace avec des conditions initiales nulles.

On pourrait montrer que le schéma-bloc peut se ramener au schéma à retour unitaire de la **figure 15**,

avec $G_1(p) = \frac{k_c}{R} \cdot \frac{1}{1 + \tau_e p}$, $G_2(p) = \frac{R}{k_c} \cdot \frac{1}{1 + \tau_{em} p}$ et $K = K_{vit} K_A K_m$.

Q17. À partir du schéma-bloc à retour unitaire de la **figure 15**, déterminer l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte $H_{BO}(p) = \frac{\Omega_s(p)}{\varepsilon_V(p)}$, en fonction de $C_V(p)$, τ_e , τ_{em} , et K .

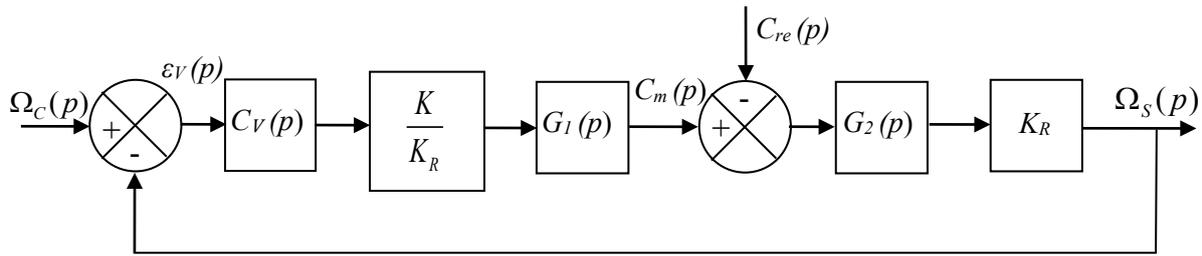


Figure 15 - Schéma-bloc équivalent pour la boucle de vitesse

Q18. En vous appuyant sur le schéma-bloc de la **figure 15** et sur une analyse de la fonction de transfert $H_{BO}(p)$, discuter de la validation de l'exigence 1.2.1.1.2. Conclure sur la nécessité de mettre en place une action intégrale au niveau du correcteur.

II.3 - Synthèse de la commande : boucle de vitesse

Objectif : déterminer les paramètres du correcteur de la boucle de vitesse afin de satisfaire l'exigence 1.2.1.1.

Le système est à présent considéré en l'absence de perturbation (étude en suivi de consigne), soit $C_{re}(p) = 0$. Le correcteur de la boucle de vitesse est un correcteur Proportionnel Intégral (PI), de fonction de transfert :

$$C_V(p) = K_i \frac{1 + T_i p}{T_i p}.$$

La constante de temps T_i est choisie de manière à compenser le pôle dominant de la fonction de transfert du moteur, ce qui revient ici à prendre $T_i = \tau_{em}$.

Q19. Déterminer, en fonction des paramètres K_i , K , τ_{em} et τ_e , l'expression littérale de la fonction de transfert en vitesse sous la forme canonique d'un système du second ordre

$$H_V(p) = \frac{\Omega_s(p)}{\Omega_c(p)} = \frac{K_V}{1 + \frac{2z}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2}.$$

Préciser la valeur de K_V et les expressions littérales de z et ω_0 .

Le gain K_i du correcteur est fixé de manière à obtenir la réponse la plus rapide sans dépassement en boucle fermée. On rappelle que pour un modèle du second ordre, la réponse la plus rapide sans dépassement est obtenue pour un facteur d'amortissement $z = 1$, valeur pour laquelle on a $t_{r5\%} \cdot \omega_0 \approx 5$. On se place dans le cas où l'inertie équivalente est maximale, soit $J_{eq} = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Q20. Déterminer l'expression de K_i ainsi que sa valeur numérique. Déterminer la valeur du temps de réponse $t_{r5\%}$ de la boucle de vitesse pour cette valeur de K_i .

Partie III - Dimensionnement du moteur d'axe 1

Objectif : déterminer le couple moteur nécessaire à l'entraînement en rotation autour de l'axe 1.

Le robot se trouvant dans la configuration bras tendu représenté sur la **figure 17**, on étudie la rotation R_1 autour de l'axe 1 (A, \vec{z}_1) . Les trois autres degrés de liberté (rotations R_2 et R_3 , translation T) du robot sont bloqués, de telle sorte que $\theta_2(t) = 0$, $\theta_3(t) = 0$ et l'extrémité de la sonde reste confondue avec l'origine O . La définition des solides, repères et angles, est celle proposée pour l'étude cinématique (**figures 5 et 6**), complétée ici avec le groupe de motorisation de l'axe 1, constitué du moteur (stator lié à **1** et rotor), du réducteur et de la transmission poulies-courroie.

Afin de déterminer le couple moteur nécessaire pour réaliser l'entraînement en rotation autour de l'axe 1 (A, \vec{z}_1) , on propose d'appliquer le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble en mouvement par rapport à $\mathbf{0}$. Le référentiel auquel est associé le repère $\mathcal{R}_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ est considéré comme Galiléen.

On note :

- E'_1 , l'ensemble constitué des solides **1, 2, 3, 4** et du stator moteur ;
- E_5 , l'ensemble constitué du rotor, des parties mobiles du réducteur et de la poulie P_1 .

Le système est soumis aux actions mécaniques extérieures suivantes :

- action de la pesanteur : $\{\tau_{pes \rightarrow E'_1}\} = \begin{Bmatrix} -m_1 g \vec{z}_0 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{G_1}$ et $\{\tau_{pes \rightarrow E_5}\} = \begin{Bmatrix} -m_5 g \vec{z}_0 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{G_5}$;
- action associée au contact sonde/patient : $\{\tau_{0 \rightarrow 4}\} = \begin{Bmatrix} F_C \vec{z}_3 \\ C_R \vec{y}_3 + C_P \vec{z}_3 \end{Bmatrix}_O$.

L'action d'entraînement du rotor moteur par le stator, considérée ici comme une action mécanique intérieure, est modélisée par le torseur suivant : $\{\tau_{Stator \rightarrow Rotor}\} = \begin{Bmatrix} \vec{0} \\ C_m \vec{z}_1 \end{Bmatrix}_{\forall P \in (D, \vec{z}_1)}$.

Les liaisons sont supposées sans frottement et la transmission de puissance par le système poulies-courroie s'effectue sans glissement.

Paramétrage cinématique

- $\mathcal{R}_1(A, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ est le repère associé à l'ensemble E'_1 ;

La rotation de $E'_1 / \mathbf{0}$ est paramétrée par l'angle variable $\theta_1(t) = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1)$.

- $\mathcal{R}_5(D, \vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$ est le repère associé à l'arbre de sortie du réducteur ;

La rotation de $\mathcal{R}_5 / \mathcal{R}_1$ est paramétrée par l'angle variable $\theta_5(t) = (\vec{x}_1, \vec{x}_5) = (\vec{y}_1, \vec{y}_5)$.

- $\mathcal{R}_m(D, \vec{x}_m, \vec{y}_m, \vec{z}_5)$ est le repère associé au rotor moteur ;

La rotation de $\mathcal{R}_m / \mathcal{R}_1$ est paramétrée par l'angle variable $\theta_m(t) = (\vec{x}_1, \vec{x}_m) = (\vec{y}_1, \vec{y}_m)$.

Données cinétiques

Ensemble $E'_1 = \{1, 2, 3, 4, \text{stator}\}$

- m_1 : masse de l'ensemble E'_1 ;
- G_1 : centre d'inertie de l'ensemble E'_1
tel que $\overrightarrow{AG_1} = y_1 \overrightarrow{y_1} - z_1 \overrightarrow{z_1}$;
- $\overline{\overline{I}}(E'_1, G_1)$: matrice d'inertie dans la base B_1 au point G_1 telle que :

$$\overline{\overline{I}}(E'_1, G_1) = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_1 & -D_1 \\ 0 & -D_1 & C_1 \end{bmatrix}_{B_1}$$

Ensemble $E_5 = \{\text{rotor, réducteur, poulie}\}$

- m_5 : masse de l'ensemble E_5 ;
- G_5 : centre d'inertie de l'ensemble E_5
situé sur l'axe $(D, \overrightarrow{z_5})$ et tel que $\overrightarrow{AG_5} = -y_5 \overrightarrow{y_1} - z_5 \overrightarrow{z_1}$;
- I_5 : moment d'inertie équivalent de l'ensemble E_5 ramené au rotor moteur.

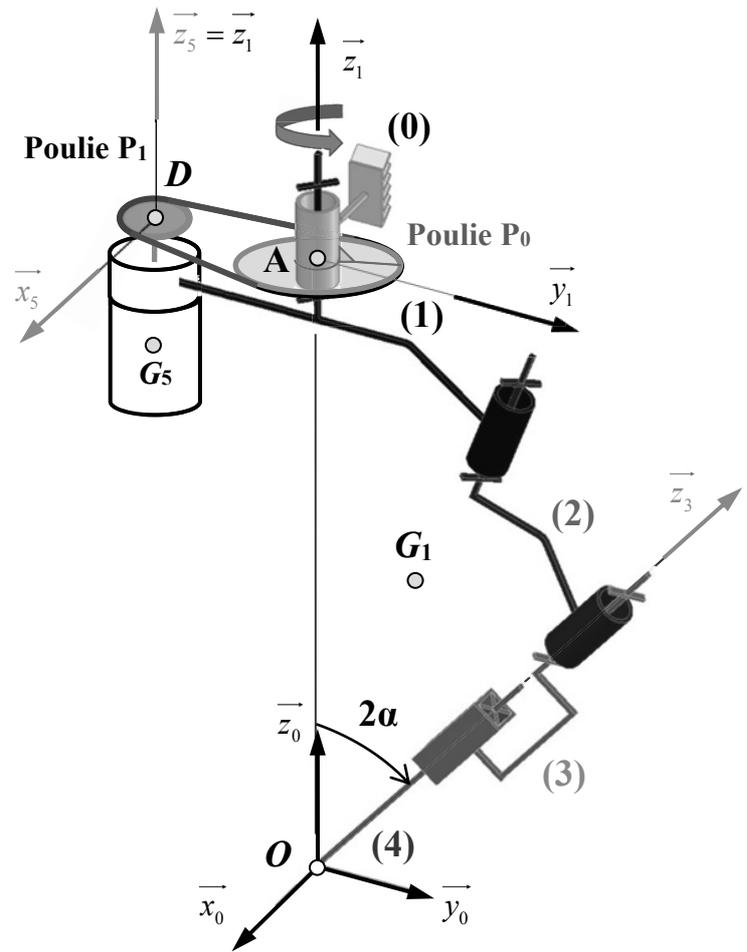


Figure 17 - Schéma cinématique et paramétrage retenus pour le dimensionnement du moteur d'axe 1

Détermination de l'énergie cinétique du système

- Q25.** Préciser les hypothèses qui ont conduit à considérer une matrice d'inertie sous la forme proposée pour l'ensemble E'_1 .
- Q26.** Déterminer l'expression de l'énergie cinétique galiléenne $E_C(E'_1/0)$ de l'ensemble E'_1 en fonction du paramètre de mouvement $\dot{\theta}_1(t)$.

La détermination de l'énergie cinétique pour l'ensemble E_5 conduirait à :

$$E_C(E_5/0) = \frac{1}{2} m_5 y_5^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_5 (\dot{\theta}_m + \dot{\theta}_1)^2$$

Une étude cinématique de la transmission réalisée par le réducteur et l'ensemble poulies-courroie, dont les caractéristiques sont précisées par la **figure 3**, permettrait d'établir la relation suivante :

$$\dot{\theta}_1(t) = -\frac{D_1}{D_0} r \dot{\theta}_m(t)$$

- Q27.** Donner alors l'expression de l'énergie cinétique totale $E_C(\{E'_1 + E_5\}/0)$ en fonction du seul paramètre de mouvement $\dot{\theta}_1(t)$. En déduire l'expression du moment d'inertie équivalent J_1 ramené à l'axe 1 $(A, \overrightarrow{z_1})$.

Détermination des puissances extérieures et intérieures

Q28. Déterminer les expressions des différentes puissances extérieures au système en fonction du seul paramètre $\dot{\theta}_1(t)$; on rappelle que dans la configuration étudiée $\theta_2(t) = 0$, $\theta_3(t) = 0$.

Q29. Déterminer l'expression de la puissance intérieure en fonction du seul paramètre $\dot{\theta}_1(t)$.

Application du théorème de l'énergie cinétique et détermination du couple moteur

Q30. Déterminer l'expression du couple moteur C_m en appliquant le théorème de l'énergie cinétique.

On donne les valeurs numériques suivantes pour une valeur de $\dot{\theta}_1$ donnée :

$$J_1 = 9,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2, C_R = -2 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}, C_P = -1 \cdot 10^{-1} \text{ N} \cdot \text{m}.$$

Q31. Déterminer la valeur numérique du couple moteur maximal C_{Max} lorsque $\ddot{\theta}_1 = 7 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$.

~~Partie IV – Analyse du geste médical (Informatique pour tous)~~

~~Les questions d'informatique doivent être traitées en langage Python.~~

~~*Objectif : spécifier les exigences 1.1 relatives au déplacement de la sonde.*~~

~~Afin de définir certaines caractéristiques du mouvement que devra imposer le robot porte-sonde à la sonde échographique, il est nécessaire de procéder à une analyse du geste médical. Pour cela, la sonde est équipée d'un dispositif de localisation magnétique permettant de réaliser des mesures de position et d'orientation au cours d'un examen échographique classique.~~

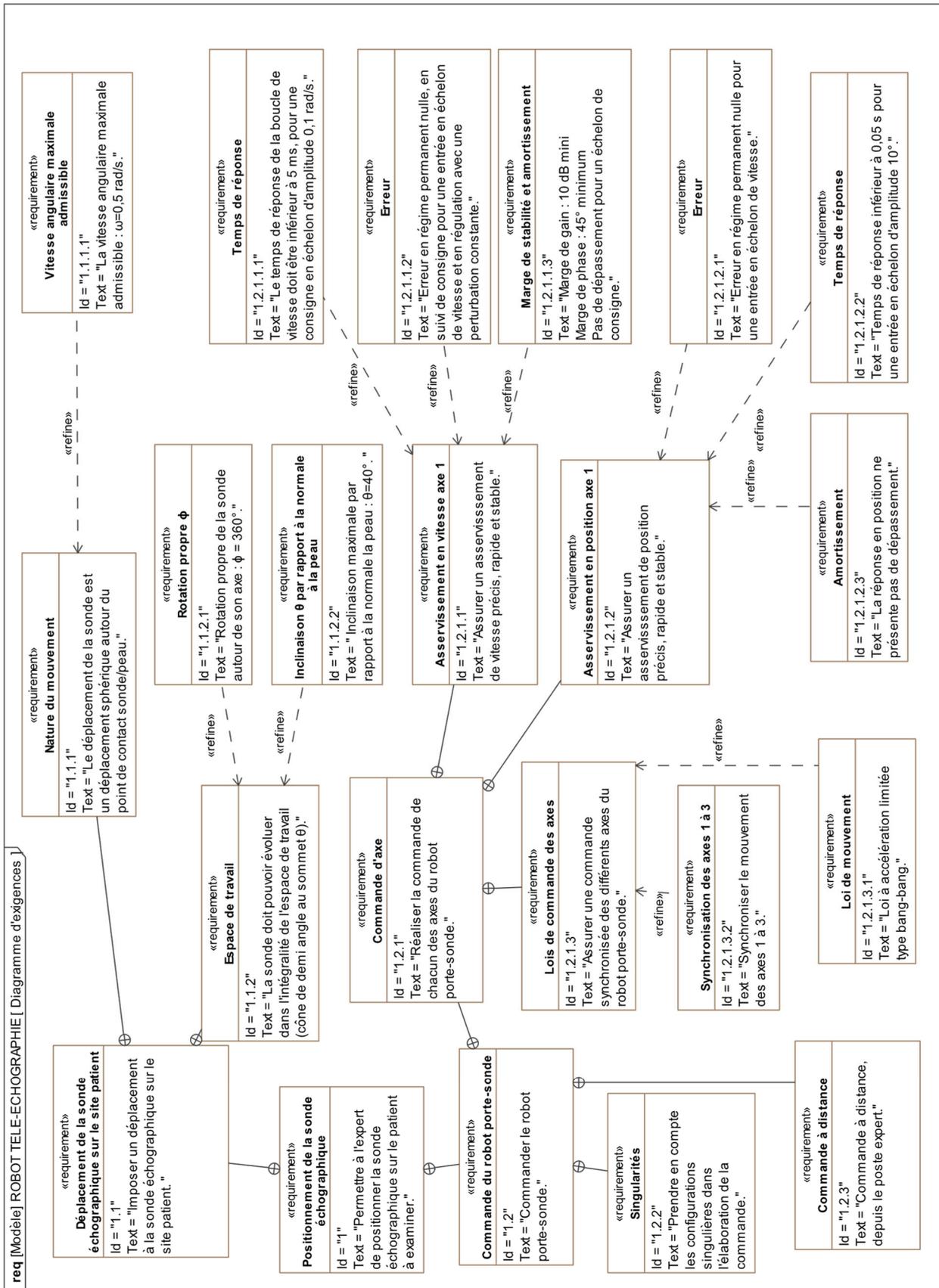
~~Lorsque la sonde est en position initiale sur le patient, le repère sonde $\mathcal{R}_s = (\vec{O}_s, \vec{x}_s, \vec{y}_s, \vec{z}_s)$ défini sur la figure 7 coïncide avec le repère de référence $\mathcal{R}_0 = (\vec{O}, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ lié au patient. Comme illustré sur la figure 18, l'évolution de l'inclinaison de l'axe de la sonde au cours de l'examen est caractérisée en relevant la trajectoire du projeté de l'extrémité du vecteur unitaire \vec{z}_s d'origine O porté par l'axe de la sonde dans un plan $(P_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$:~~

~~La trajectoire P_0P peut être décrite à partir des composantes $z_{sx} = \vec{z}_s \cdot \vec{x}_0$ suivant \vec{x}_0 et $z_{sy} = \vec{z}_s \cdot \vec{y}_0$ suivant \vec{y}_0 du vecteur unitaire (qui sont aussi les coordonnées du point P). L'évolution de ces composantes au cours de l'examen est représentée sur la figure 19.~~

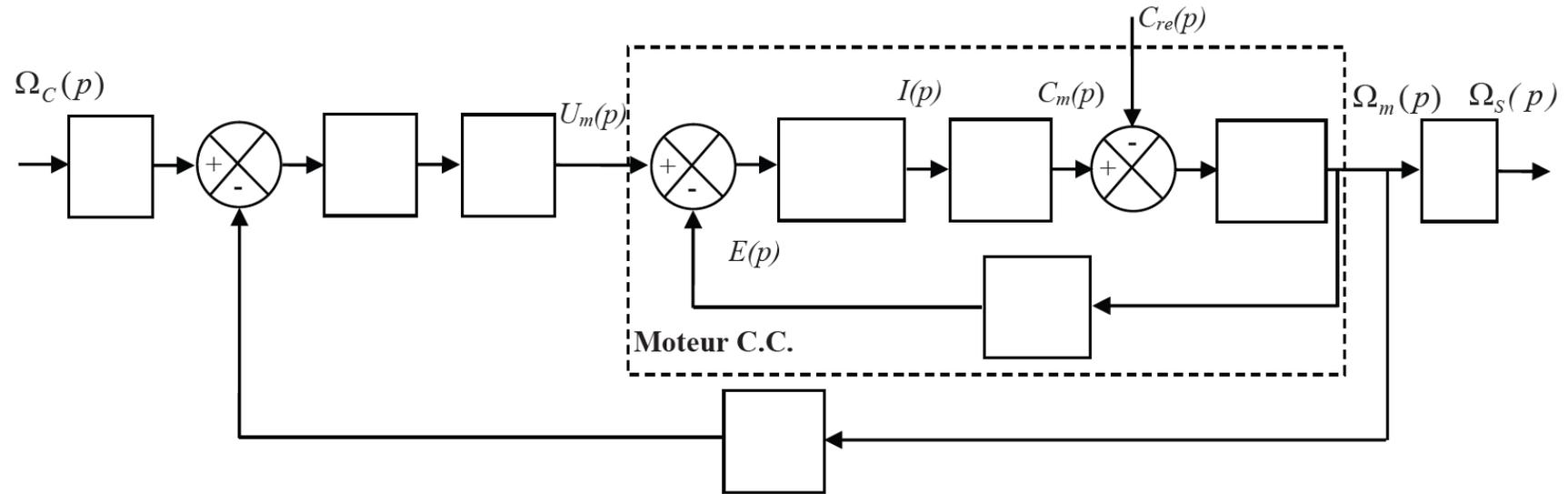
~~Amplitude angulaire maximale~~

Q32. ~~Déterminer la relation liant les coordonnées (z_{sx}, z_{sy}) du point P à l'inclinaison θ de l'axe de la sonde correspondant à la nutation avec le paramétrage des angles d'Euler introduit.~~

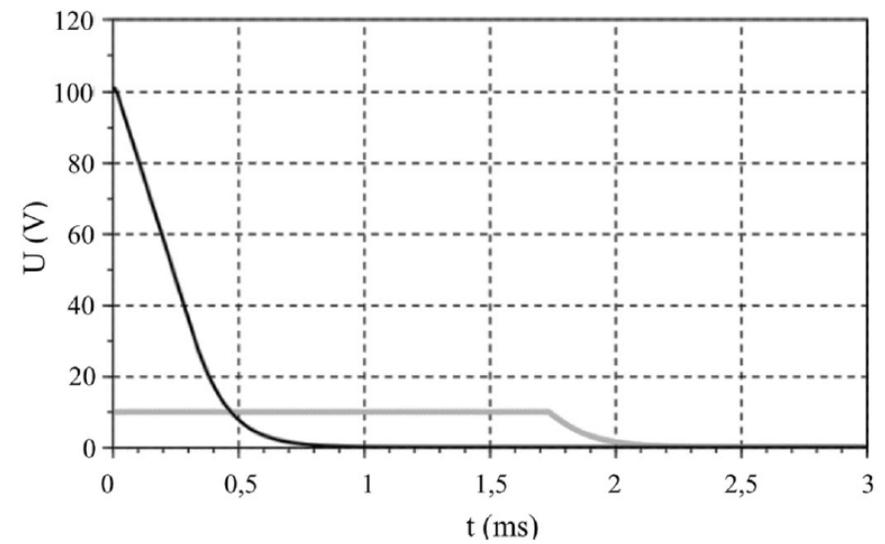
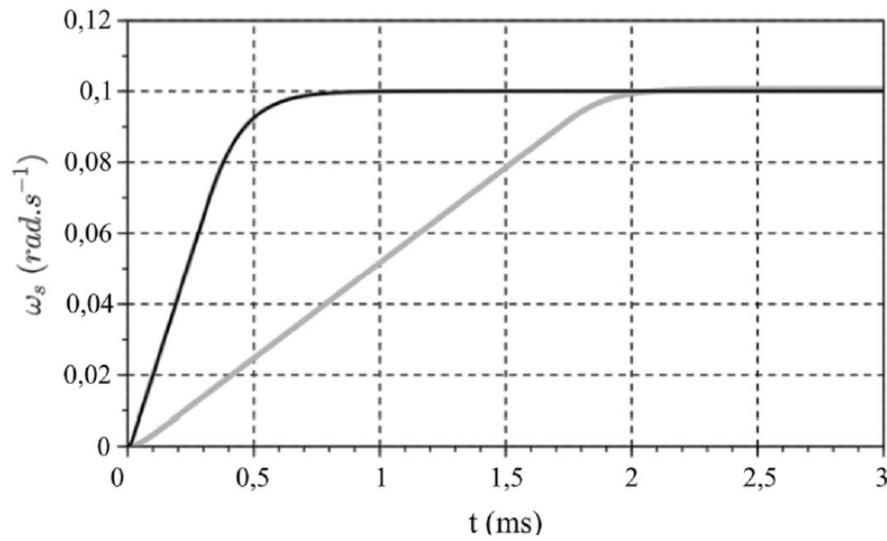
D5 - Diagramme d'exigences



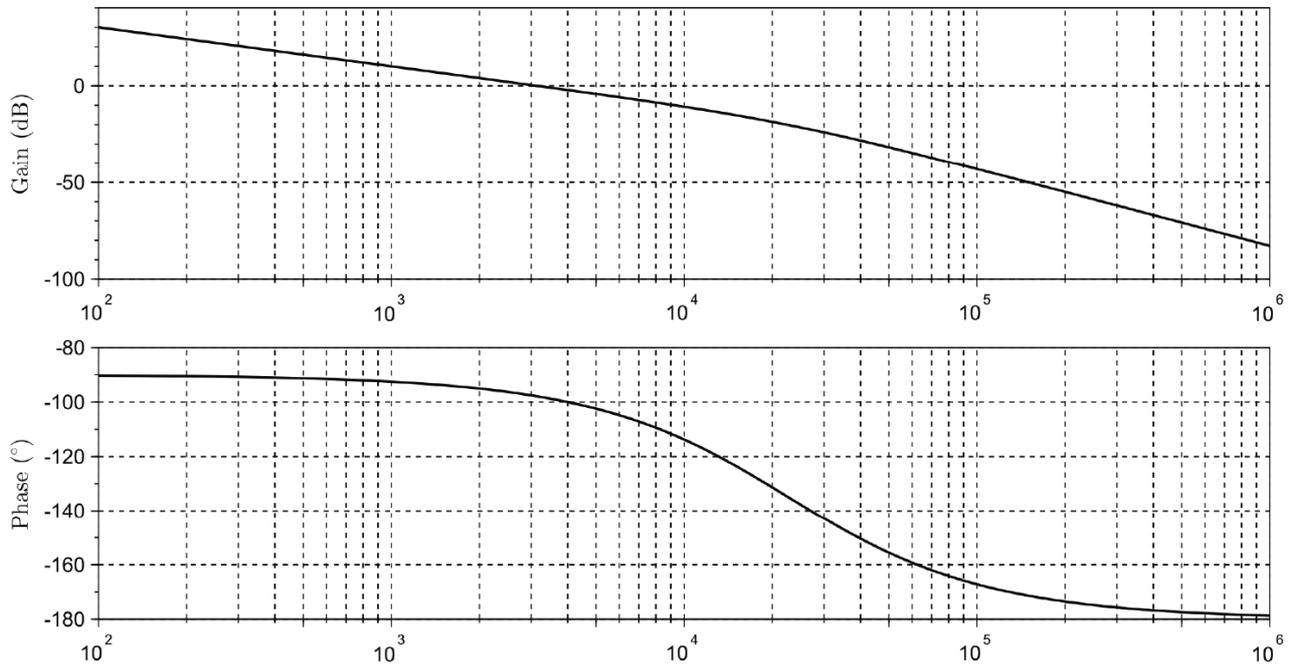
Q11 et Q16



Q22



Q21



Q24

