

# DS 03- Système de télé-échographie

PTSI

Samedi 07 décembre 2024

## Table des matières

<b>I</b>	<b>Présentation</b>	<b>2</b>
<b>II</b>	<b>Validation des performances cinématiques du robot porte-sonde</b>	<b>4</b>
<b>III</b>	<b>Commande en position du robot porte-sonde</b>	<b>10</b>
<b>IV</b>	<b>Lecture de plan</b>	<b>15</b>
<b>V</b>	<b>Annexe</b>	<b>17</b>

# Système de télé-échographie

## I Présentation

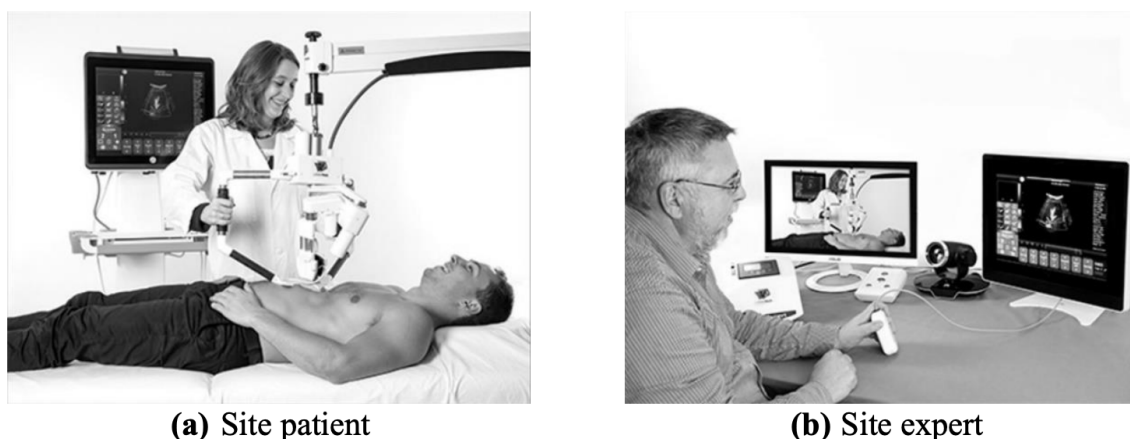


FIGURE 1 – Principe de la télé-échographie

### I.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).

Sur le site patient (figure 1-a) 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 1-b), 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.

## I.2 Analyse système partielle

Le diagramme d'exigences donné en Annexe, 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.

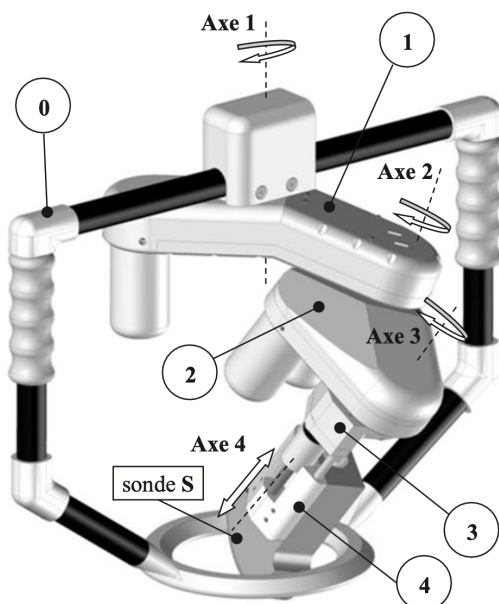
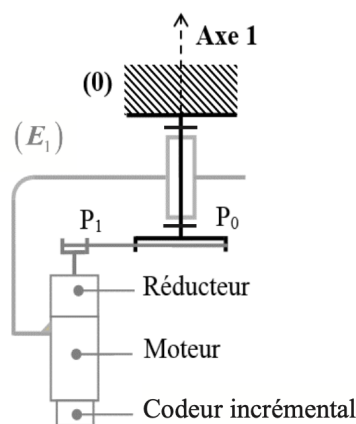


Figure 2 - Robot porte-sonde

FIGURE 2 – Robot porte-sonde



Réducteur (R)	Rapport de réduction $r = 1/30$
Poulie P <sub>0</sub>	Diamètre D <sub>0</sub> = 46 mm
Poulie P <sub>1</sub>	Diamètre D <sub>1</sub> = 12 mm

FIGURE 3 – Caractéristiques de la transmission

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

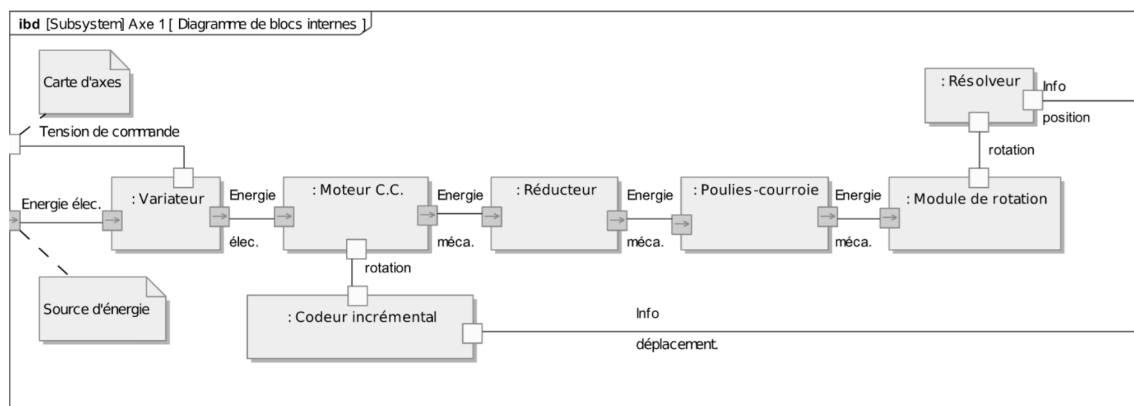


FIGURE 4 – Diagramme de blocs internes de l'axe 1

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 bloc internes de la figure 4.

### I.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.

### I.4 Démarche proposée

Le respect des exigences 1.1 relatives au déplacement de la sonde fait l'objet de la Partie 2. 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).

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), c'est l'objet de la Partie 3,.

## II 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.

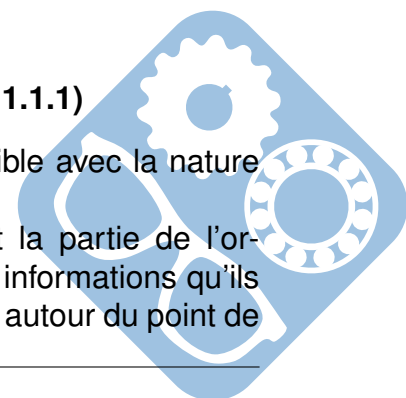
### Modélisation cinématique du robot porte-sonde

Le schéma cinématique du robot porte-sonde et le paramétrage associé sont donnés dans les figures 5 et 6. Il n'est pas nécessaire de savoir lire un schéma cinématique pour répondre aux questions.

#### II.0.1 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.

**Objectif intermédiaire :** Démontrer que dans la configuration bras tendu,  $\overrightarrow{V_{O_S \in 4/0}} = \vec{0}$ .

**Question 1 :** A l'aide des informations données figure 5, écrire une composition de vecteurs vitesse pour donner l'expression de  $\overrightarrow{V_{O_S \in 4/0}}$ .

**Question 2 :** Dans la configuration bras tendu, déterminer  $\overrightarrow{\Omega_{1/0}}$  et  $\overrightarrow{\Omega_{2/1}}$ .

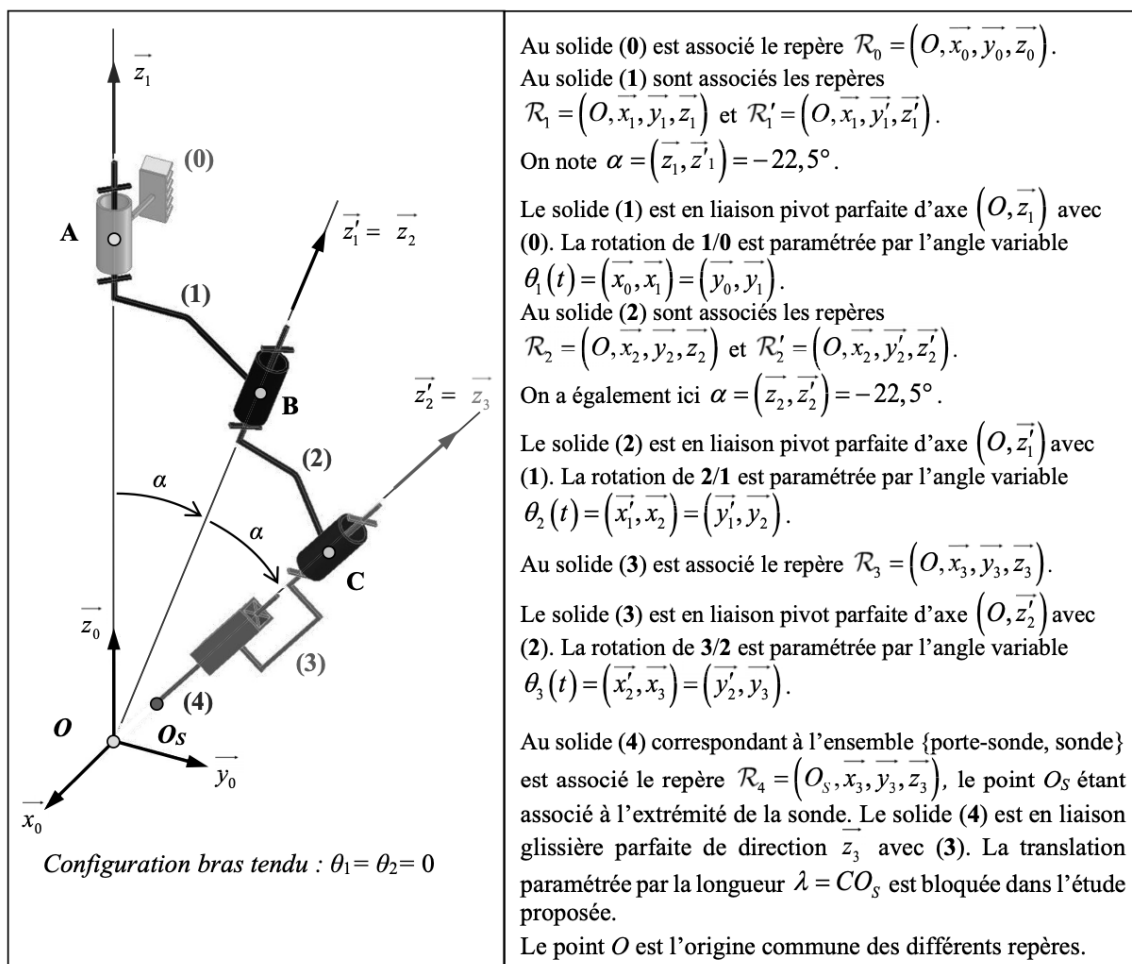


FIGURE 5 – Schéma cinématique et paramétrage du robot porte-sonde configuration bras tendu

**Question 3 :** Le point A est sur l'axe de rotation entre le solide 1 et le bâti 0. Déterminer  $\overrightarrow{V_{O_S \in 1/0}}$  en écrivant une relation de champs de vecteurs vitesse entre les points A et  $O_S$  dans le mouvement de 1 par rapport au bâti (Théorème de Varignon).

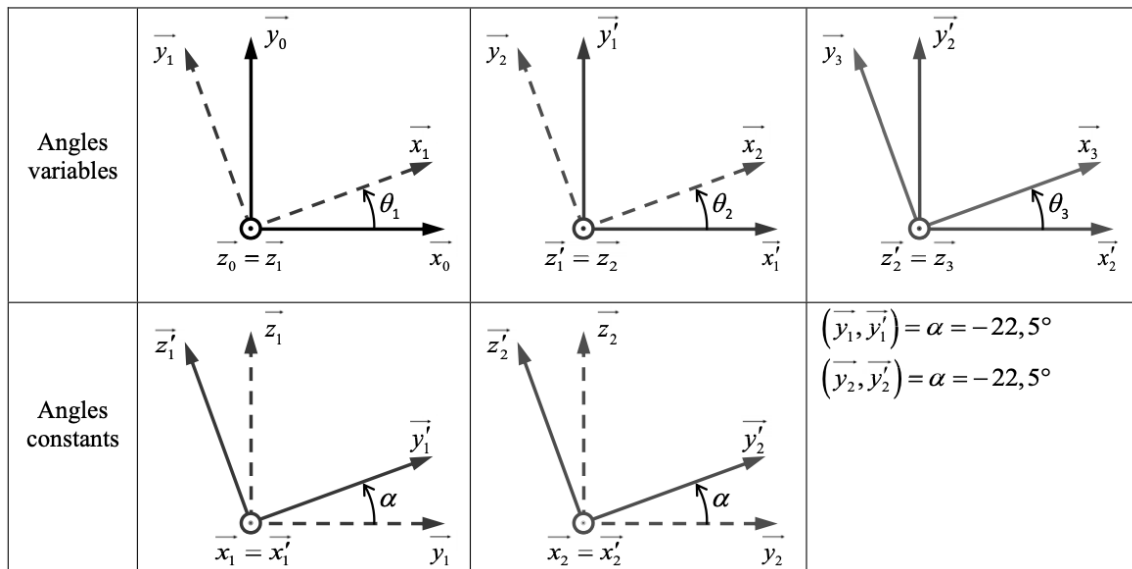


FIGURE 6 – Figures de changement de base associées au robot porte-sonde

**Question 4 :** Le point B est sur l'axe de rotation entre le solide 2 et le solide 1. Déterminer  $\vec{V}_{O_S \in 2/1}$  en écrivant une relation de champs de vecteurs vitesse entre les points B et  $O_S$  dans le mouvement de 2 par rapport à 1 (Théorème de Varignon).

**Question 5 :** La translation du solide 4 par rapport à 3 est bloquée dans l'étude proposée. Déterminer alors  $\vec{V}_{O_S \in 4/3}$ .

**Question 6 :** Sachant que  $\vec{O_S C} = \lambda \cdot \vec{z}_3$ , déterminer  $\vec{V}_{O_S \in 3/2}$ .

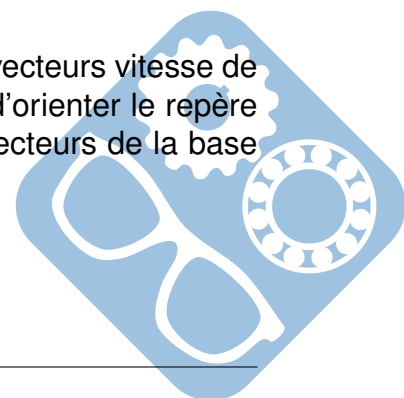
**Question 7 :** A l'aide des questions précédentes, démontrer alors que dans la configuration bras tendu,  $\vec{V}_{O_S \in 4/0} = \vec{0}$ .

**Objectif :** Validation de l'exigence 1.1.1

**Question 8 :** On rappelle que  $\alpha = (\vec{z}_1, \vec{z}'_1) = (\vec{y}_1, \vec{y}'_1) = (\vec{z}_2, \vec{z}'_2) = (\vec{y}_2, \vec{y}'_2)$ . Exprimer  $\vec{z}'_1$  dans la base  $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  et  $\vec{z}'_2$  dans la base  $(\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ .

**Question 9 :** En appliquant la loi de composition de mouvement sur les vecteurs vitesse de rotation, justifier, sans développer les calculs, qu'il est a priori possible d'orienter le repère  $R_3$  lié à la sonde par rapport au repère  $R_0$  par 3 rotations suivant les vecteurs de la base  $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ .

**Question 10 :** Conclure quant à la validation de l'exigence 1.1.1



## II.1 Validation de l'exigence « Espace de travail » (exigence 1.1.2)

**Objectif :** Vérifier l'étendu de l'espace de travail (exigence 1.1.2)

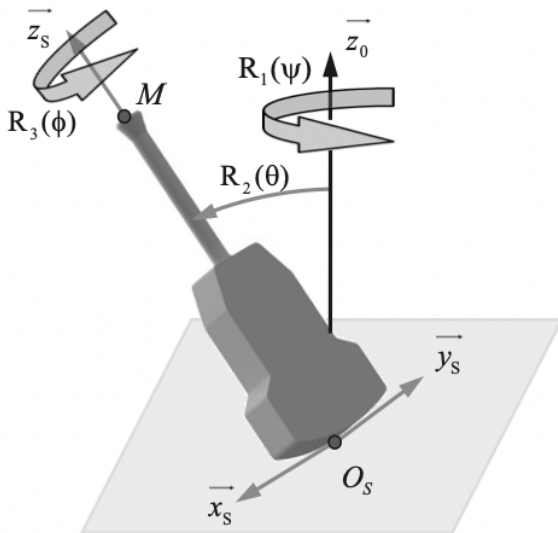


Figure 7 - Repère lié à la sonde et rotations

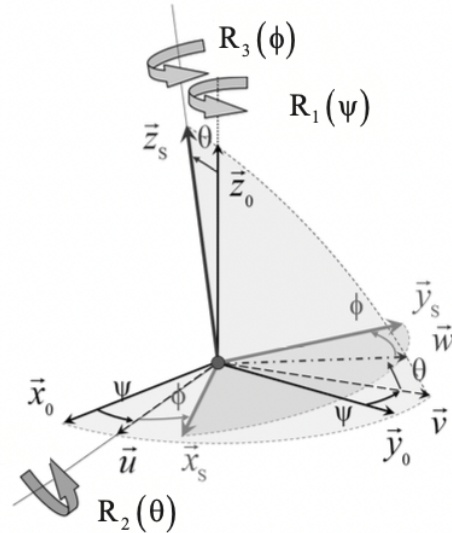


Figure 8 - Angles d'Euler

FIGURE 7 – Repères liés à la sonde

L'espace de travail d'un robot est défini comme l'ensemble des positions et orientations accessibles par le repère lié à son organe terminal. En se limitant à la configuration où la sonde reste en contact avec le patient (les points  $O_S$  et  $O$  restent confondus), la détermination de l'espace de travail revient ici à définir l'ensemble des orientations possibles pour l'ensemble porte-sonde, sonde, c'est-à-dire celles du repère  $R_3 = (O, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$  par rapport au repère  $R_0 = (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ .

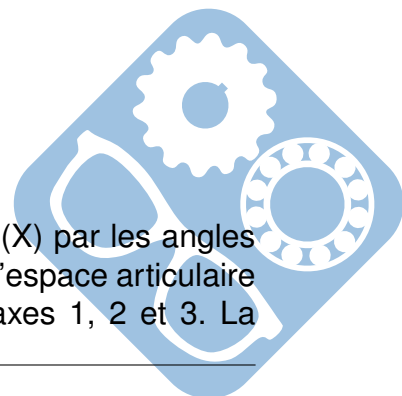
## II.2 Orientation de la sonde par rapport au patient

À la sonde (S) est associé le repère  $R_S = (O, \vec{x}_S, \vec{y}_S, \vec{z}_S)$  défini sur la figure 7. Ce repère est coïncident avec le repère  $R_3$ . Le contact sonde/patient est assimilé à un contact ponctuel au point  $O_S$ . L'orientation de la sonde par rapport au patient est paramétrée par trois successives  $R_1(\psi)$ ,  $R_2(\theta)$  et  $R_3(\phi)$  auxquelles sont associés les angles d'Euler ( $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ ) (figures 7) :

- $\psi = (\vec{x}_0, \vec{u}) = (\vec{y}_0, \vec{v})$  est associé à la rotation  $R_1$  autour de  $\vec{z}_0$ ,
- $\theta = (\vec{v}, \vec{w}) = (\vec{z}_0, \vec{z}_S)$  est associé à la rotation  $R_2$  autour de  $\vec{u}$ ,
- $\phi = (\vec{u}, \vec{x}_S) = (\vec{w}, \vec{y}_S)$  est associé à la rotation  $R_3$  autour de  $\vec{z}_S$ .

## II.3 Élaboration d'un modèle géométrique direct partiel

L'orientation de la sonde est paramétrée dans l'espace opérationnel (X) par les angles ( $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ ). Elle est liée à la configuration du robot défini quant à elle dans l'espace articulaire (Q) par les angles ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ) paramétrant les rotations autour des axes 1, 2 et 3. La



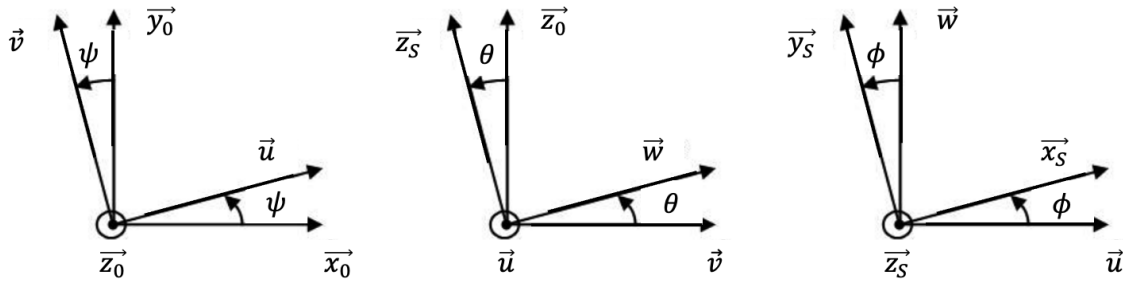
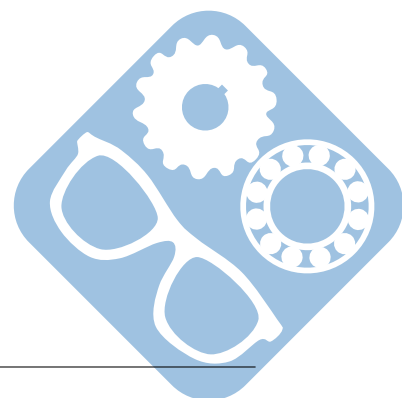


FIGURE 8 – Figures de changement de repère

détermination de l'espace de travail nécessite d'établir la relation entre les coordonnées opérationnelle ( $\psi, \theta, \phi$ ), c'est-à-dire élaborer le modèle géométrique direct du robot.

**Question 11 :** L'orientation de l'axe de la sonde étant définie par le vecteur  $\vec{z}_S = \vec{z}_3$ , déterminer les expressions des projections de ce vecteur  $\vec{z}_S$  dans la base  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{z}_0)$  en fonction des coordonnées opérationnelles ( $\theta$ ), puis dans la base  $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  en fonction des coordonnées opérationnelles ( $\psi, \theta$ ).





De la même manière, il est possible d'exprimer ce vecteur en projection dans la base  $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  en fonction des coordonnées articulaires  $(\theta_1, \theta_2)$  :

$$\vec{z}_3 = \begin{pmatrix} \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot \sin\theta_1 + \sin\alpha \cdot (\cos\alpha \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 + \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2) \\ -\cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot \cos\theta_1 - \sin\alpha \cdot (\cos\alpha \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2) \\ \cos^2\alpha - \sin^2\alpha \cdot \cos\theta_2 \end{pmatrix}$$

**Question 12 :** Par identification des projections suivant  $\vec{z}_0$ , déterminer l'expression de l'angle  $\theta$  en fonction de  $\theta_2$  et  $\alpha$ . Commenter le résultat obtenu et proposer une analyse de la courbe donnée en figure 9.

**Question 13 :** Montrer qu'en procédant de même avec les projections suivant  $\vec{x}_0$  et  $\vec{y}_0$ , on obtient les expressions suivantes permettant de calculer l'angle  $\psi$  :

$$\cos\Psi = \frac{\sin\alpha \cdot (-\sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 + \cos\alpha \cdot \cos\theta_1 \cdot (1 + \cos\theta_2))}{\sin\theta} \quad (1)$$

$$\sin\Psi = \frac{\sin\alpha \cdot (\cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2 + \cos\alpha \cdot \sin\theta_1 \cdot (1 + \cos\theta_2))}{\sin\theta} \quad (2)$$

Des relations similaires non présentées ici peuvent être obtenues pour l'angle  $\phi$ . L'ensemble de ces résultats permet notamment d'obtenir les courbes de la figure 10, qui représentent les évolutions des angles  $\psi$  et  $\phi$  pour  $\theta_1 = 0^\circ$  et  $\theta_2 \in [0^\circ; 180^\circ]$ .

**Question 14 :** À partir d'une analyse des courbes obtenues, préciser en justifiant la réponse :

- les configurations dans lesquelles se trouve le robot pour les valeurs extrêmes de l'angle  $\theta$  relatives à la courbe de la figure 9,
- les valeurs associées de l'angle  $\beta = (\vec{x}_0, \vec{x}_S)$ ,
- la nature et les caractéristiques de la surface générée par le mouvement de l'axe de la sonde  $(O, \vec{z}_S)$ .

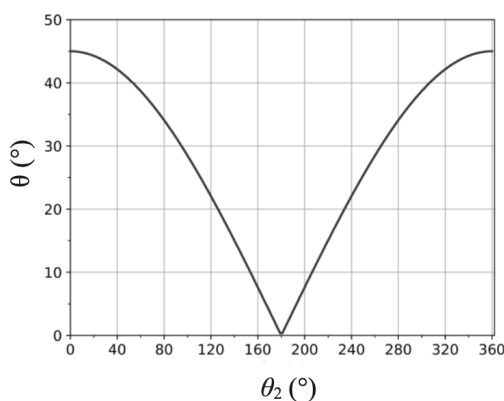


FIGURE 9 – Évolution de l'angle  $\theta$  en fonction du paramètre articulaire  $\theta_2$

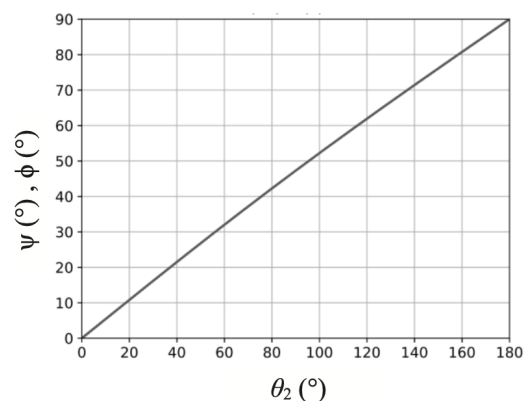


FIGURE 10 – Évolution des angles  $\psi$  et  $\phi$  (les courbes sont ici confondues)

## II.4 Prise en compte des butées articulaires

En pratique, l'espace de travail est limité par la présence de butées mécaniques sur les articulations, liées aux contraintes de mise en œuvre technique. En prenant comme référence la position du robot « bras tendu », les valeurs de ces butées sont telles que pour les 2 premiers axes :  $\theta_1 \in [-165^\circ, 165^\circ]$ ,  $\theta_2 \in [20^\circ, 340^\circ]$ . Il n'y a pas de limitation sur l'axe 3 pour lequel  $\theta_3 \in [0^\circ, 360^\circ]$ . L'espace de travail peut être décrit à partir des positions accessibles par le point M, extrémité du vecteur unitaire  $\vec{z}_S$  d'origine  $O_S$ , porté par l'axe de la sonde (figure 7). Les points de coordonnées  $(z_{Sx}, z_{Sy}, z_{Sz})$  associés à ces positions ont été représentés sur la figure 11 (le pas d'échantillonnage des paramètres articulaires  $\theta_1$  et  $\theta_2$  est de  $2^\circ$ ) pour 2 configurations (a) et (b).

**Question 15 :** A partir de l'analyse des tracés de la figure 11, conclure quant à la validation de l'exigence 1.1.2 liée à l'espace de travail attendu.

Soit la fonction  $f$  définie de l'espace articulaire (Q) vers l'espace opérationnel (X), dont les applications coordonnées  $(f_1, f_2)$  sont telles que  $f_1(\theta_1, \theta_2) = \theta$  et  $f_2(\theta_1, \theta_2) = \psi$ .

**Question 16 :** La fonction  $f$  est-elle bijective ? Justifier votre réponse en vous appuyant sur les tracés de la figure 11 et proposer une interprétation. Quelles seront les conséquences lors de la conception de la commande du robot ?

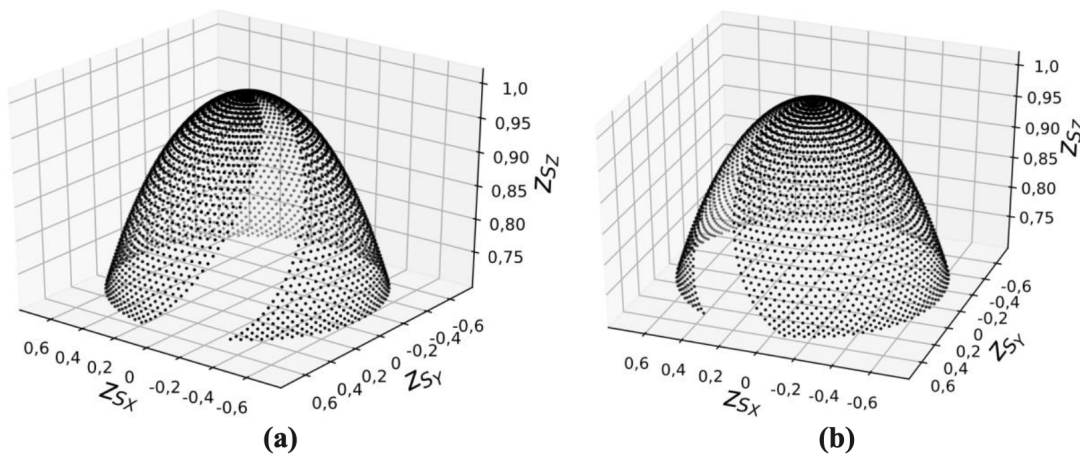


FIGURE 11 – Représentation de l'espace de travail  $\theta_2$  de 20 à 180° (a) et  $\theta_2$  de 180 à 340° (b)

## III 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.



### III.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  $(\Psi, \theta, \phi)$  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.

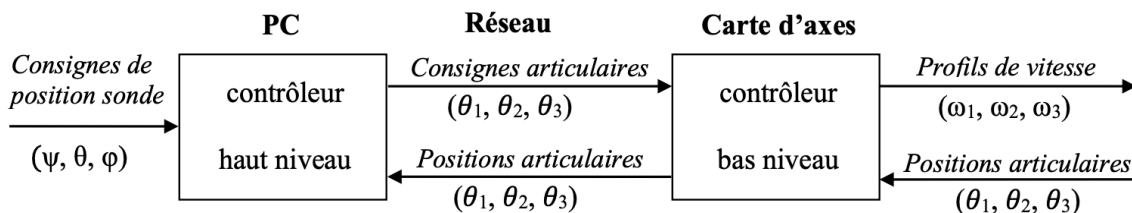


FIGURE 12 – Principe de commande du robot porte-sonde

#### 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  $\theta_1$  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.

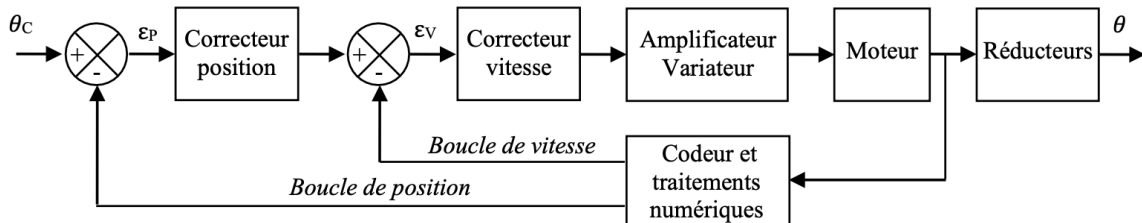
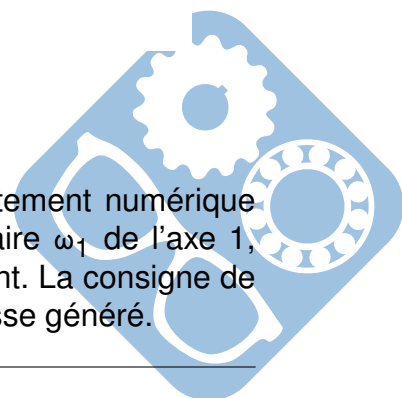


FIGURE 13 – Structure de l’asservissement d’un axe

Un codeur incrémental, solidaire de l’axe moteur permet après traitement numérique d’obtenir une image de la position angulaire  $\theta_1$  et de la vitesse angulaire  $\omega_1$  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.



### III.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

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  $c_{re}(t)$ .

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e(t) \tag{3}$$

$$c_m(t) = k_c \cdot i(t) \tag{4}$$

$$e(t) = k_e \cdot \omega_m(t) \tag{5}$$

$$c_m(t) - c_{re}(t) = J_{eq} \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} \tag{6}$$

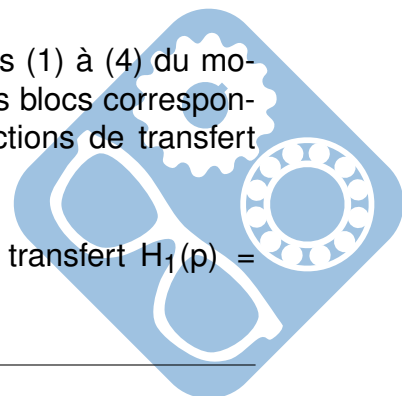
Les différentes grandeurs intervenant dans le modèle sont définies sur la figure 14 suivante :

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	6 $\Omega$
$L$	Inductance de l'induit	0,2 mH
$k_e$	Constante de force contre-électromotrice	$3 \cdot 10^{-2}$ V/(rad/s)
$k_c$	Constante de couple	$3 \cdot 10^{-2}$ N·m/A
$J_{eq}$	Inertie équivalente ramenée sur l'axe moteur	$\in [ 5 \cdot 10^{-6}, 9 \cdot 10^{-6} ]$ kg·m <sup>2</sup>

FIGURE 14 – Grandeurs associées au modèle de la motorisation

**Question 17 :** Déterminer les transformations de Laplace des équations (1) à (4) du moteur définies en considérant des conditions initiales nulles. Compléter les blocs correspondants sur le schéma-bloc fourni sur le document réponse par les fonctions de transfert manquantes.

**Question 18 :** Déterminer les expressions littérales des fonctions de transfert  $H_1(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U(p)} \Big|_{C_{re}(p)=0}$  et  $H_2(p) = \frac{\Omega_m(p)}{C_{re}(p)} \Big|_{U(p)=0}$ . Mettre sous forme canonique.



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

**Question 19 :** Déterminer les valeurs numériques des constantes de temps  $\tau_e$  et  $\tau_{em}$ , pour les valeurs extrêmes de  $J_{eq}$ . En déduire qu'une constante de temps peut être considérée comme négligeable devant l'autre.

**Question 20 :** Montrer, en précisant l'expression de  $K_m$ , que la fonction  $H_1(p)$  peut alors de mettre sous la forme :  $H_1(p) \approx \frac{K_m}{(1+\tau_e \cdot p)(1+\tau_{em} \cdot p)}$ .

### Modélisation de la boucle de vitesse

La figure 15 présente la structure de la boucle de vitesse associée à la commande de l'axe 1. Pour une consigne de vitesse de rotation  $\omega_c(t)$  [ $m \cdot s^{-1}$ ], 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.

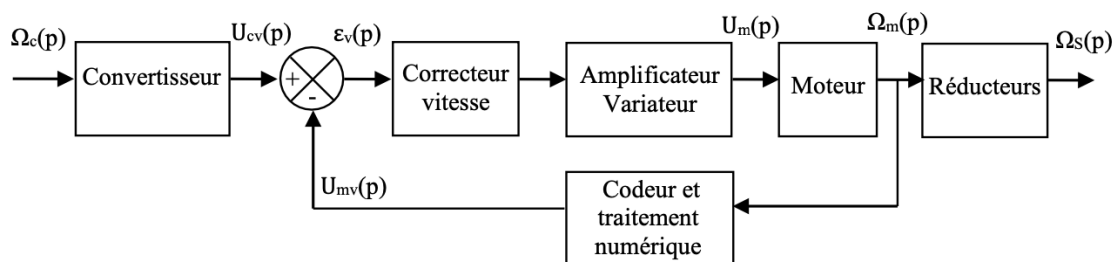


FIGURE 15 – Asservissement en vitesse d'un axe

Le tableau de la figure 16 liste les gains des différents composants intervenant dans la commande de l'axe 1.

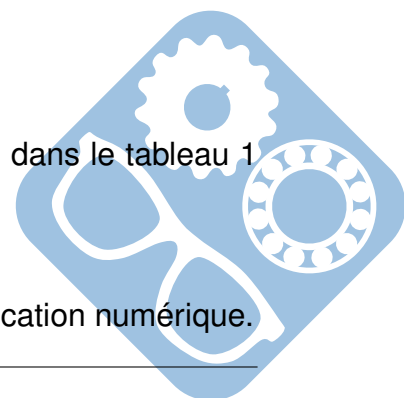
Blocs	Fonctions de transfert
Convertisseur	$K_{conv}$ (à déterminer)
Correcteur vitesse	$C_V(p)$ (réglé par la suite)
Amplificateur/variateur	$K_A = 10$
Codeur et traitement	$K_{vit} = 8 \cdot 10^{-3}$ V/(rad/s)
Réducteurs	$K_R$ (à déterminer)

FIGURE 16 – Gains des composants

On rappelle que les caractéristiques de la transmission sont définies dans le tableau 1 de la figure 3.

On note que  $\frac{\Omega_S}{\Omega_r} = -\frac{D_1}{D_0}$  et  $\frac{\Omega_r}{\Omega_m} = r$ .

**Question 21 :** Déterminer l'expression du gain  $K_R$  (littérale). Faire l'application numérique.



**Question 22 :** Déterminer  $\varepsilon_V(p)$  en fonction de  $\Omega_S(p)$ ,  $\Omega_C(p)$ ,  $K_{conv}$ ,  $K_{vit}$  et  $K_R$ . Déterminer l'expression de  $K_{conv}$  pour que  $\varepsilon_V(p) = 0$  lorsque  $\Omega_S(p) = \Omega_C(p)$ . Faire l'application numérique.

**Question 23 :** Compléter le schéma-bloc sur le document réponse 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 17, avec  $G_1(p) = \frac{k_C}{R} \cdot \frac{1}{1+\tau_e \cdot p}$ ,  $G_2(p) = \frac{R}{k_C} \cdot \frac{1}{1+\tau_{em} \cdot p}$  et  $K = K_{vit} \cdot K_A \cdot K_m$ .

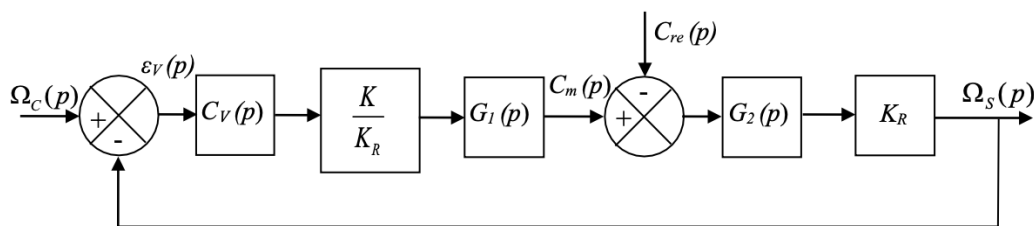


FIGURE 17 – Schéma-bloc équivalent pour la boucle de vitesse

**Question 24 :** A partir du schéma-bloc à retour unitaire de la figure 17, déterminer l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte  $H_{BO}(p) = \frac{\Omega_S(p)}{\varepsilon_V(p)} \Big|_{C_{re}(p)=0}$  et de la fonction boucle fermée  $H_{BF}(p) = \frac{\Omega_S(p)}{\Omega_C(p)} \Big|_{C_{re}(p)=0}$  en fonction de  $C_V(p)$  (constante),  $\tau_e$ ,  $\tau_{em}$ ,  $K$  et les paramètres du moteur. Indiquer la classe et l'ordre de ces 2 fonctions de transfert.

On considère une entrée  $\Omega_C(p)$  en échelon,  $\Omega_C(p) = \frac{\Omega_0}{p}$ , avec  $\Omega_0 = 0.1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $C_V(p) = 1$ .

**Question 25 :** Démontrer que  $\varepsilon_V(p) = (1 - H_{BF}(p)) \cdot \Omega_C(p)$ . En citant le théorème utilisé, calculer l'erreur statique  $\varepsilon_S$ . Discuter de la validation de l'exigence 1.2.1.1.2.

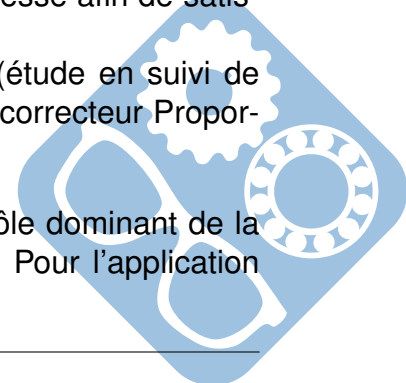
Il est nécessaire de mettre en place une action intégrale au niveau du correcteur.

### III.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 :  $C_V(p) = K_i \cdot \frac{1 + T_i \cdot p}{T_i \cdot p}$

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  $T_i = \tau_{em}$ . Pour l'application numérique on prendra  $\tau_{em} = \tau_{em \text{ max}}$ .



**Question 26 :** Déterminer en fonction des paramètres  $K_i$ ,  $K$ ,  $\tau_{em}$  et  $\tau_e$ , l'expression littérale de la fonction de transfert en vitesse sous la forme canonique d'un système du second ordre :  $H_V(p) = \frac{\Omega_S(p)}{\Omega_C(p)} = \frac{K_V}{1 + \frac{2 \cdot z}{\omega_0} \cdot p + \frac{1}{\omega_0^2} \cdot p^2}$ . Préciser la valeur de  $K_V$  et les expressions

littérales de  $z$  et  $\omega_0$ .

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  $t_{r5\%} \omega_0 \approx 5$ . On se place dans le cas où l'inertie équivalente est maximale, soit  $J_{eq} = 8.6 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ .

**Question 27 :** 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  $K_i$ .

On donne, sur le document réponse question 28, le diagramme de Bode de la fonction de transfert boucle ouverte  $H_{BO}(p)$  ainsi corrigée.

**Question 28 :** Tracer les asymptotes sur le diagramme de Bode en Gain et sur le diagramme de Bode en phase. Déterminer alors graphiquement  $H_{BO}(p)$  et ses valeurs caractéristiques.

### III.4 Performances de la commande en position

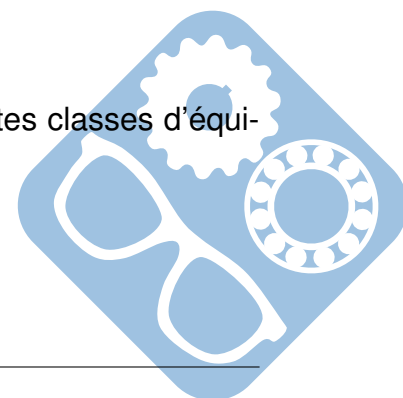
**Objectif :** Vérifier les performances attendues pour la boucle de position (exigence 1.2.1.2.).

Les performances de la boucle de vitesse étant validées, on complète le modèle numérique avec la boucle de position (figure 13). Les paramètres du correcteur Proportionnel Intégral Dérivé (PID) de la boucle de position sont déterminés à l'aide de l'outil de simulation numérique. La réponse temporelle en position de l'axe 1, pour une consigne en échelon de  $10^\circ$ , est représentée sur la figure du document réponse, question 29.

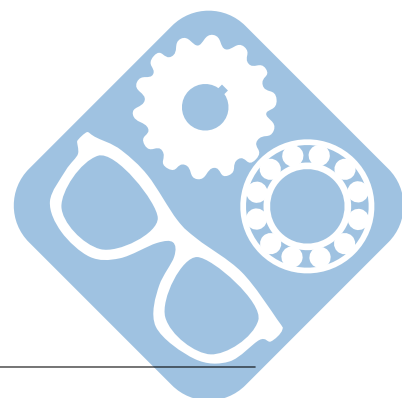
**Question 29 :** En faisant apparaître les constructions, déterminer graphiquement le temps de réponse à 5% du système. Conclure quant au respect de l'exigence 1.2.1.2.

## IV Lecture de plan

**Question 30 :** Sur le dessin du document réponse, colorier les différentes classes d'équivalence du système.



# Fin de l'épreuve





## V Annexe

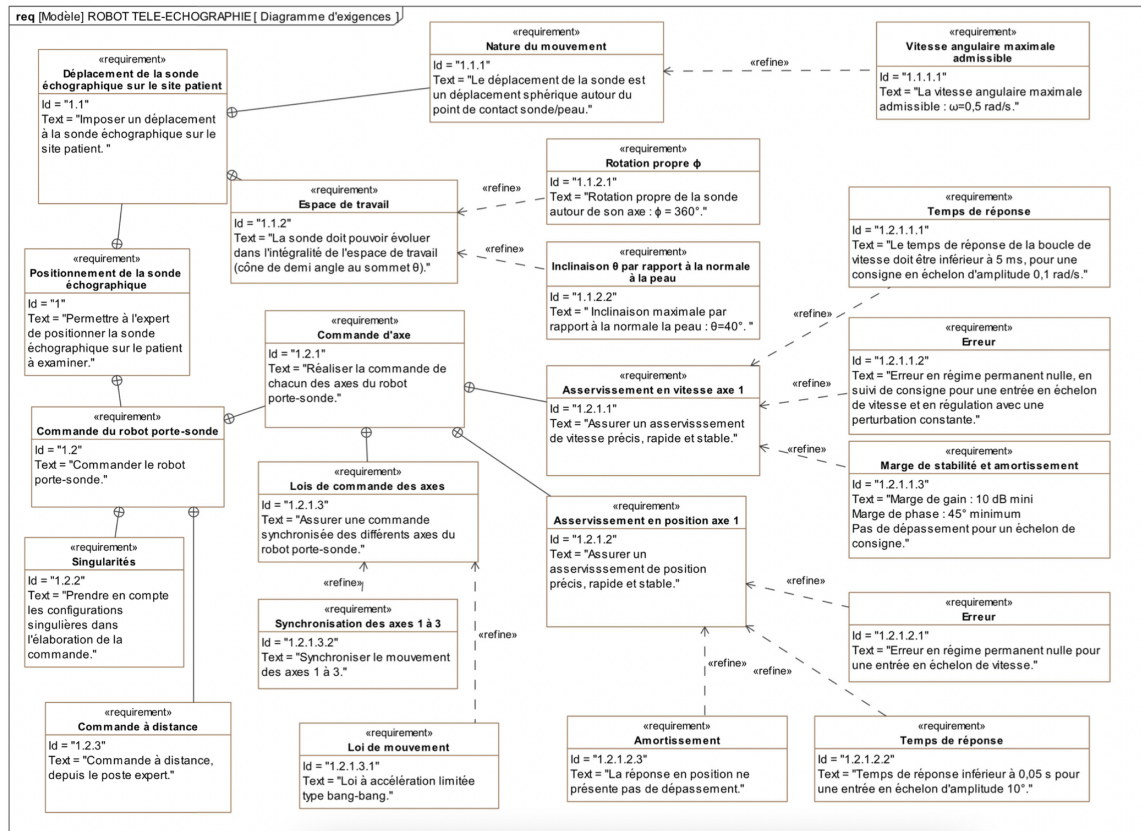
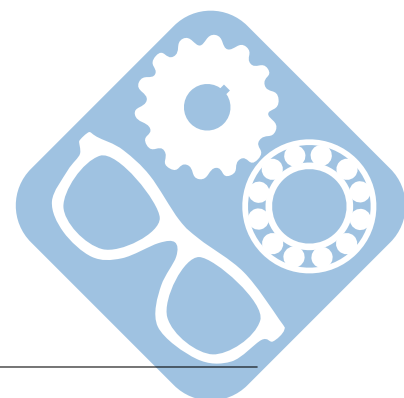
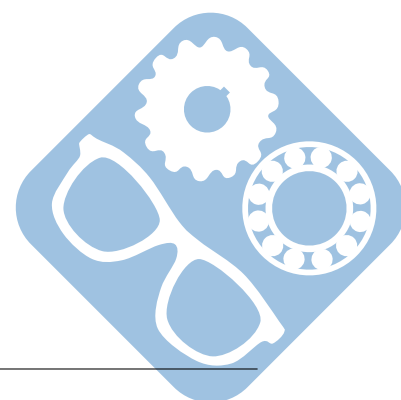


FIGURE 18 – Diagramme d'exigences













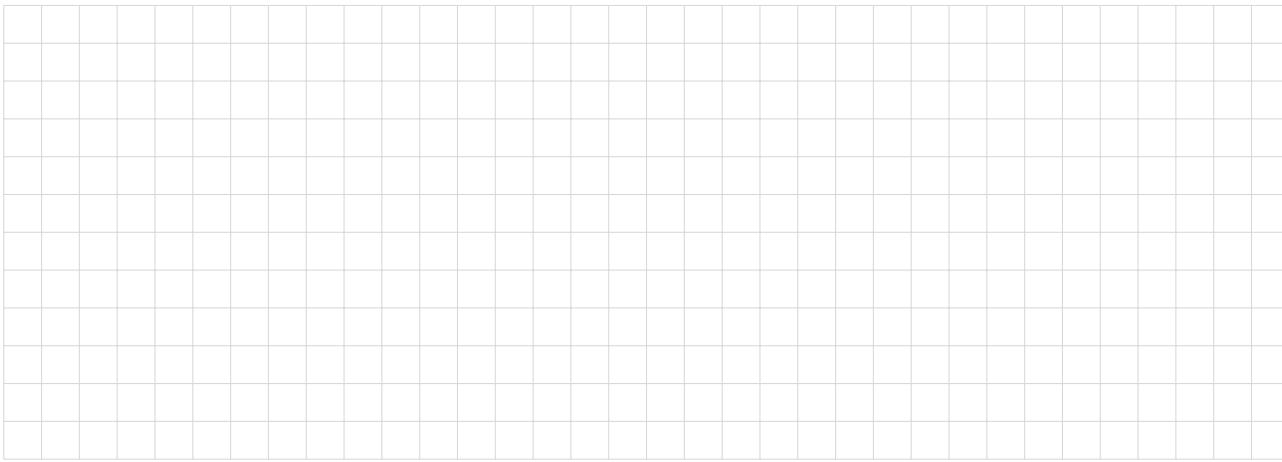




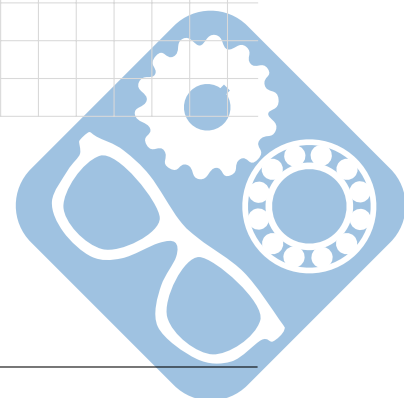
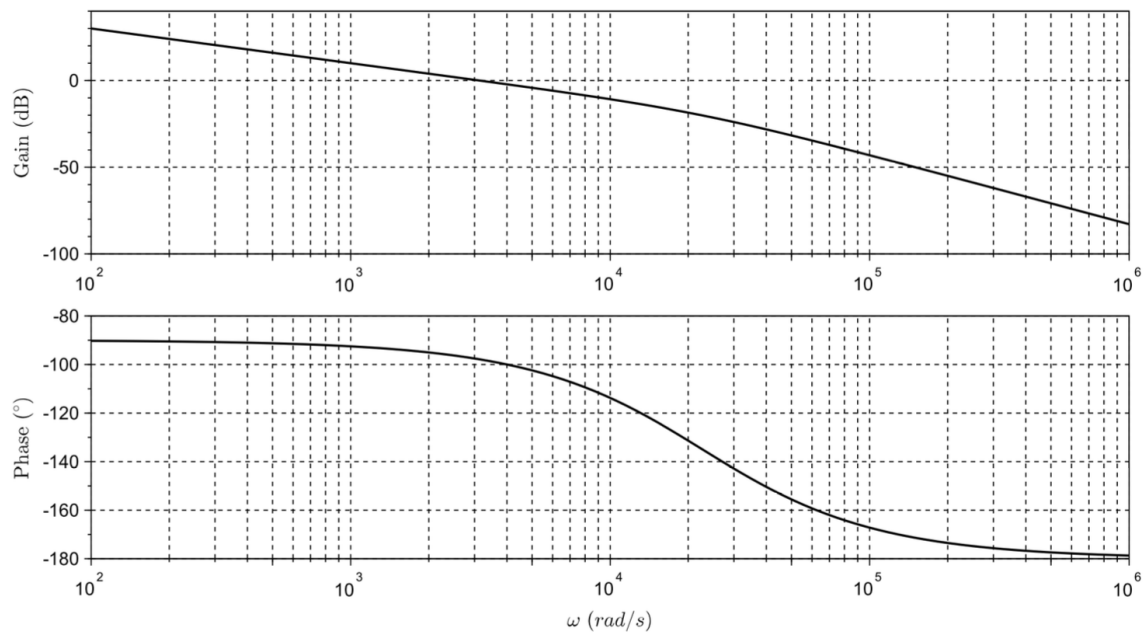




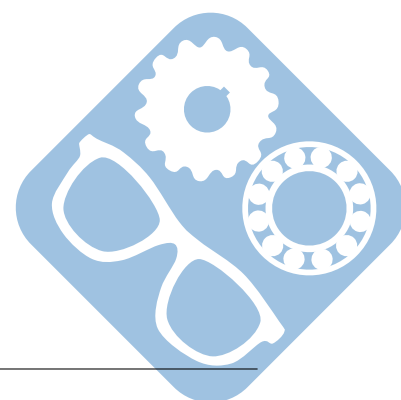
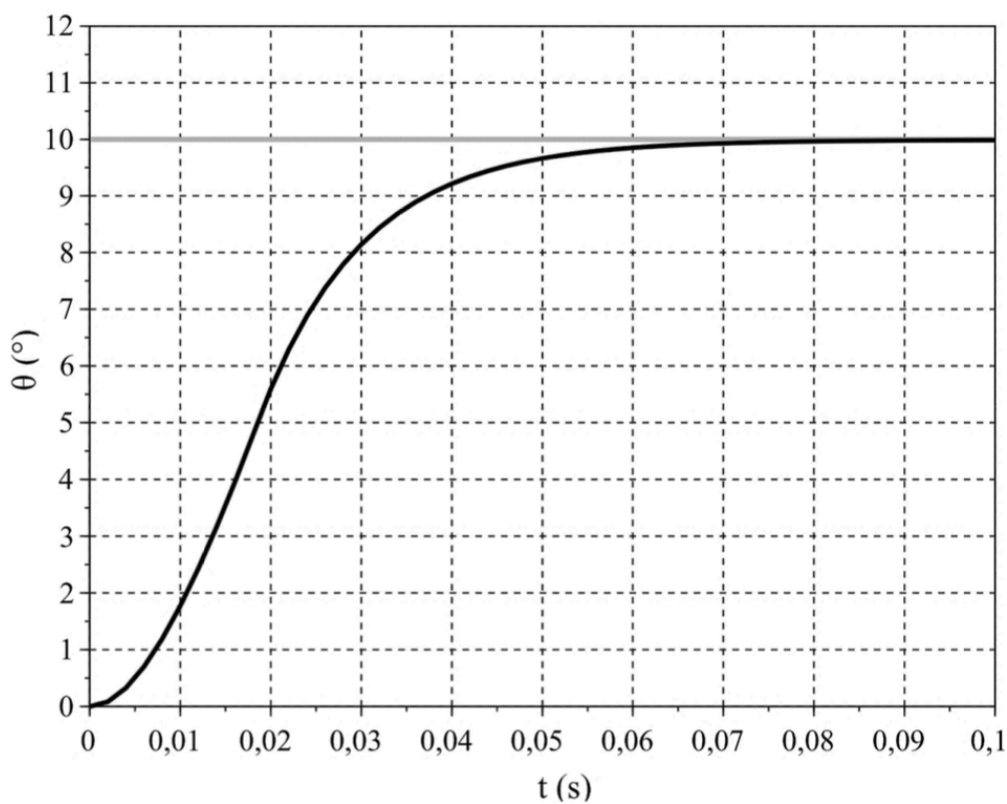
**Question 27 :**



**Question 28 :**



Question 29 :



Question 30 :

Presse :

