

# Partie I – Robot de transfert des Wafers

*Les notations cinématiques standards pour les vitesses, les accélérations, ... sont attendues lors des réponses aux différentes questions. Une pénalité sera appliquée si ces notations ne sont pas respectées.*

## 1 Présentation du système

La production de microprocesseurs et de puces électroniques performantes et miniaturisées nécessite de graver des circuits sur silicium à une échelle de quelques dizaines de nanomètres. La production se fait en salle blanche, sur des disques de silicium appelés *wafer*, et sur lesquels sont gravés quelques dizaines à plusieurs milliers de processeurs simultanément (FIGURE 1). Le wafer est ensuite découpé pour séparer les processeurs.

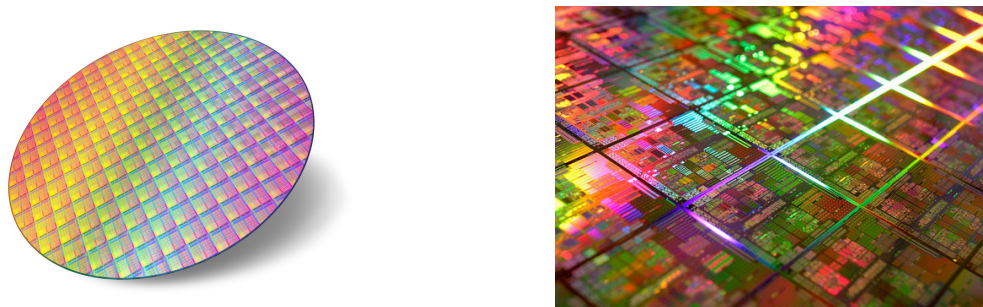


FIGURE 1 – Wafer gravé de dizaines de processeurs.

Les salles blanches étant nettoyée de toute poussière, l'homme n'entre pas dans les salles de production : ce sont des robots qui manipulent les wafers. En particulier, les transferts de wafers entre les racks de rangement et les machines de traitement sont réalisés par des robots de type Scara (FIGURE 2).

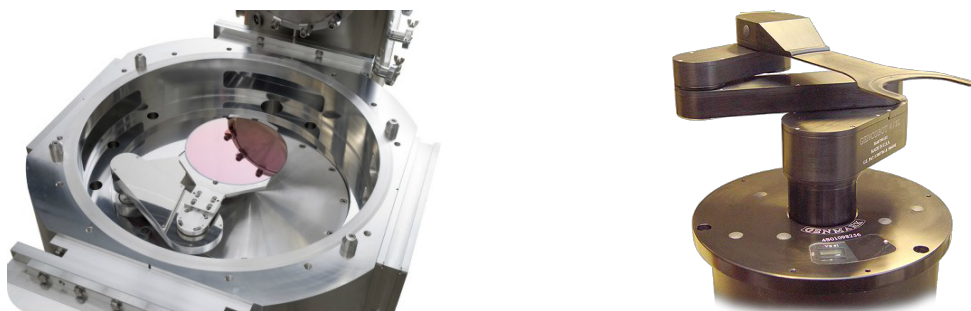


FIGURE 2 – Robot de transfert des wafers entre deux postes de production.

Les wafers étant très fins et cassants, ils sont très fragiles. Leur positionnement doit toujours être parfait si bien que les robots se déplacent à accélérations maîtrisées de façon à ce que les wafers ne puissent pas glisser sur les supports. Les relations entre les vitesses angulaires des moteurs et les vitesses et accélérations du wafer font l'objet de cette étude.

Un extrait du cahier des charges regroupe les exigences suivantes :

Transferer des wafers	Temps de transfert entre deux postes	< 8 s
	Accélération maximale du wafer	0.5 g
	Vitesse angulaire maximale des moteurs	10 tr.min <sup>-1</sup>
	Temps nécessaire pour poser/soulever un wafer	0.5 s

## 2 Modélisation cinématique du robot Scara de transfert de wafers

La FIGURE 3 montre une illustration du robot de transfert dans le plan  $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$ . Trois bras numérotés **1**, **2** et **3**, sont en rotations successives entre eux. Le bras **1** est aussi en rotation avec le bâti **0**. Le wafer, de centre  $W$ , est fixé à l'extrémité du dernier bras. Les distances  $OA$  et  $AB$  sont notées  $R$  et la distance  $BW$  est notée  $d$ . On donne  $R = 1$  m et  $d = 0.5$  m.

Chacun des mouvements de rotations est motorisé par un moteur  $M_k$  non représenté. On note  $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  le repère fixe lié au bâti **0**, supposé galiléen.

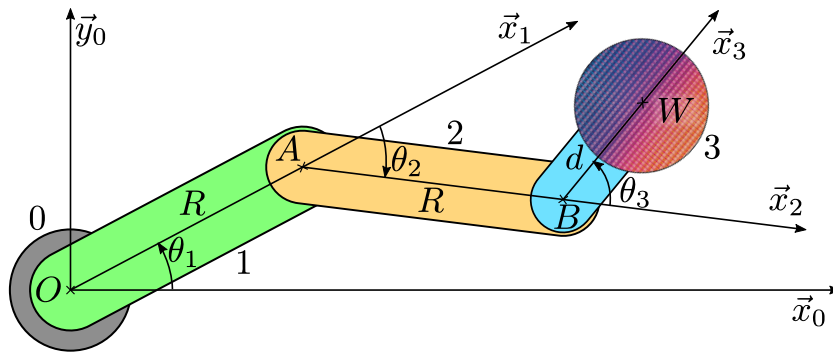


FIGURE 3 – Paramétrage cinématique du mouvement du robot.

**Q 1.** Proposer un schéma cinématique du robot de transfert de wafers et reporter le paramétrage cinématique sur le schéma. Vous devez **impérativement** utiliser la représentation appropriée des liaisons pivots et/ou glissières selon le mouvement autorisé entre deux solides successifs ainsi que **deux couleurs différentes pour deux solides en contacts** afin de faciliter leur identification, sans cela, aucun point ne sera attribué à la question.

**Q 2.** Dessiner la (ou les) figure(s) de changement de base associés aux différents angles  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  et  $\theta_3$ .

## 3 Caractérisation du mouvement dans le cas général

Cette partie vise à établir la relation entre les vitesses angulaires des moteurs  $M_k$  et la position, la vitesse et l'accélération du wafer afin d'établir les lois de commandes des moteurs.

**Q 3.** Déterminer l'expression du vecteur position du centre  $W$  du wafer, observé dans le référentiel du bâti.

**Q 4.** Déterminer, par dérivation, l'expression de la vitesse du centre  $W$  du wafer par rapport au bâti.

**Q 5.** Déterminer, par dérivation, l'expression de l'accélération du centre  $W$  du wafer par rapport au bâti.

On se propose d'utiliser le formalisme d'étude de la cinématique des solides indéformables, on s'intéresse en particulier au torseur cinématique du wafer dans son mouvement par rapport au bâti.

**Q 6.** Exprimer les torseurs cinématiques élémentaires de chacune des liaisons modélisant les contacts entre solides.

**Q 7.** Donner, en énonçant les propriétés utilisées, le torseur cinématique du wafer par rapport au bâti en le réduisant au centre  $W$  du wafer.

## 4 Phase de rotation du robot Scara

Le transfert d'un wafer d'un emplacement à un autre s'effectue en plusieurs temps :

- Rotation du robot dans la direction de l'emplacement actuel.
- Déploiement du robot sous le wafer puis soulèvement du wafer.
- Repliement du robot puis rotation du robot tenant le wafer vers le nouvel emplacement.
- Déploiement du robot vers l'emplacement, dépose du wafer et retour du robot en position repliée.

Le robot est alors prêt à exécuter un nouveau cycle de transfert. Au cours de ce cycle, le robot réalise seulement deux types de mouvements :

- un mouvement de translation du plateau suivant  $(O, \vec{x}_3)$ ,
- un mouvement de rotation d'ensemble autour de l'axe  $(O, \vec{z}_0)$ .

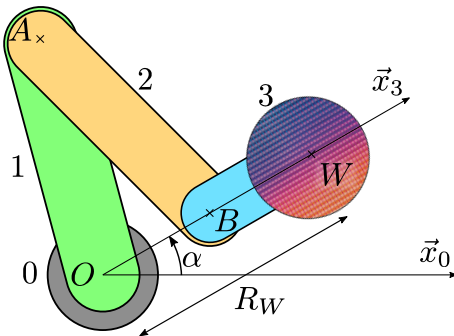


FIGURE 4 – Position du robot en phase de rotation

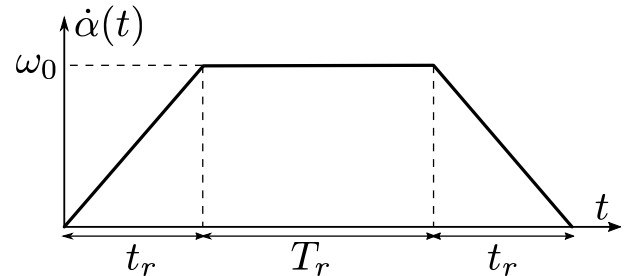


FIGURE 5 – Loi de vitesse en phase de rotation.

Cette partie s'intéresse au mouvement de rotation tandis que la partie suivante s'intéresse au mouvement de déploiement.

On suppose le robot dans la position de la FIGURE 4, où le point  $W$  est à la distance  $R_W$  de l'axe de rotation  $(O, \vec{z}_0)$  tel que  $\overrightarrow{OW} = R_W \vec{x}_3$ . On note  $\vec{n}$  la direction vers laquelle pointe le robot, paramétré par l'angle  $\alpha$ .

On remarquera que, bien que les angles  $\alpha$  et  $\theta_1$  soient différents, leurs vitesses sont égales :  $\dot{\alpha} = \dot{\theta}_1$ . Les angles  $\theta_2$  et  $\theta_3$ , ainsi que la distance  $R_W$  sont constants dans cette phase.

Le robot tourne à une vitesse non constante, suivant un profil de vitesse angulaire  $\dot{\alpha}(t)$  en trapèze défini FIGURE 5. Les temps caractéristiques sont  $t_r = 0.2$  s et  $T_r = 0.8$  s tandis que la vitesse de rotation en phase de vitesse constante vaut  $\omega_0 = 0.4$  rad/s.

**Q 8.** Compléter le document réponse FIGURE 8 en traçant les profils d'accélération angulaire  $\ddot{\alpha}(t)$  et de position angulaire  $\alpha(t)$ , en calculant puis en reportant les valeurs caractéristiques sur les courbes.

**Q 9.** Déterminer l'accélération du centre  $W$  du wafer par rapport au bâti, puis déterminer la norme de l'accélération.

**Q 10.** Calculer le rayon  $R_W$  maximal admissible permettant de satisfaire à l'exigence d'accélération maximale du wafer.

**Q 11.** Quelle est la valeur maximale du rayon  $R_W$  que peut atteindre le robot Scara en pratique. En déduire si celui-ci peut suivre le profil de vitesse  $\dot{\alpha}$  proposé lors de sa phase de rotation quelles que soient les valeurs des angles  $\theta_2$  et  $\theta_3$ .

## 5 Phase de déploiement du robot Scara

Durant la phase de déploiement (FIGURE 6), le mouvement du plateau est une translation radiale suivant  $(O, \vec{x}_0)$ . Les deux points  $B$  et  $W$  se déplacent sur la droite  $(O, \vec{x}_0)$  et la distance  $R_W$  n'est plus constante. Le déploiement s'effectue sur une longueur  $L = 1$  m, de  $R_W = 0.5$  m à  $R_W = 1.5$  m.

**Q 12.** Déterminer les expressions des angles  $\theta_2$  et  $\theta_3$  en fonction de  $\theta_1$  permettant d'assurer ce mouvement particulier.

**Q 13.** Déterminer la position radiale  $R_W$  du wafer en fonction de  $\theta_1$  et des distances  $R$  et  $d$ .

On souhaite appliquer au wafer le profil de vitesse en trapèze de la FIGURE 7, où  $t_d = 0.2$  s et  $V_0 = 0.5$  m.s<sup>-1</sup>. Il faut pour cela calculer la commande consigne en vitesse à appliquer aux moteurs.

**Q 14.** Déterminer à partir de la loi trapèze de vitesse imposé, le temps  $T_d$  de déplacement à vitesse constante, permettant d'atteindre en fin de mouvement un déplacement de 1 m. En déduire le temps total de déploiement.

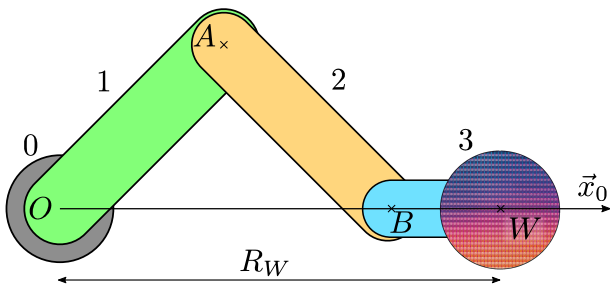


FIGURE 6 – Position du robot en phase de déploiement.

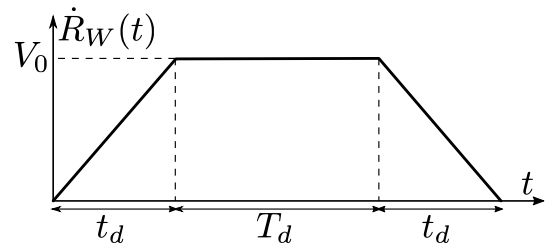
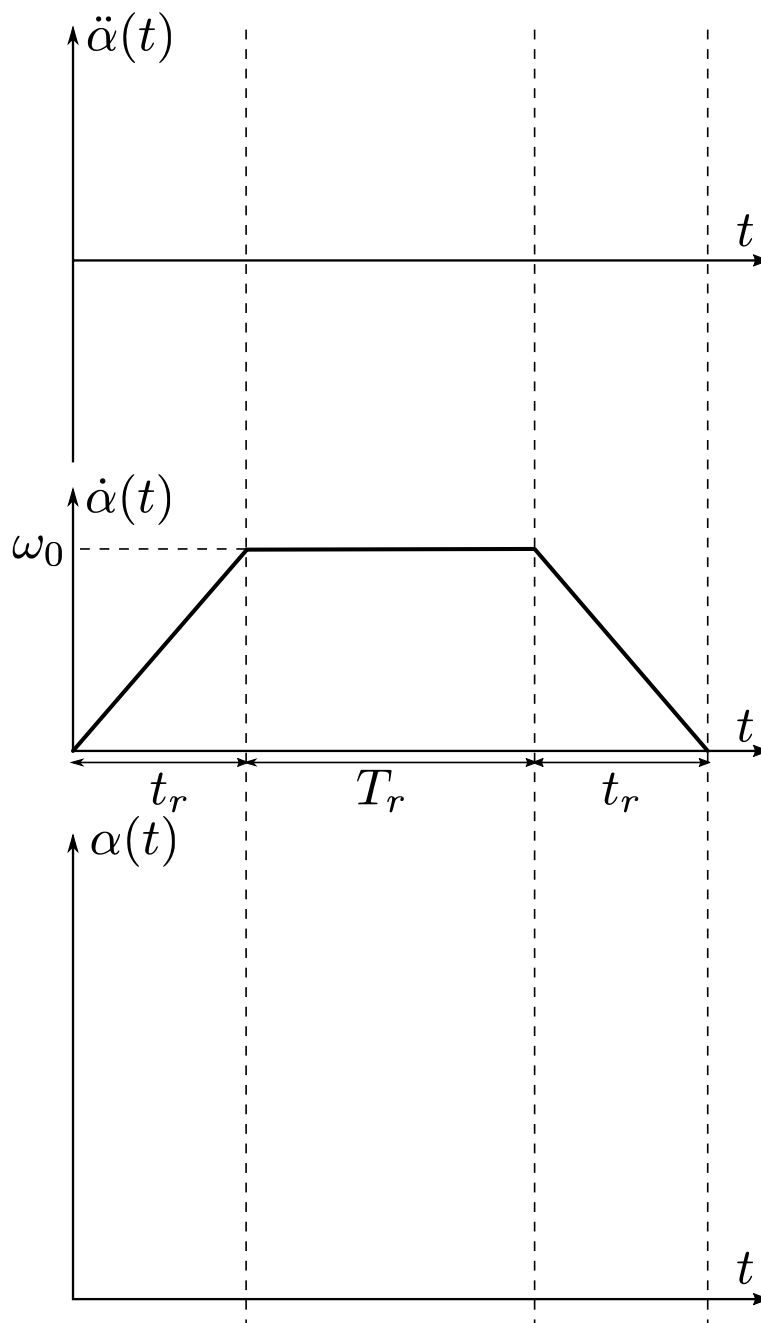


FIGURE 7 – Loi de vitesse en phase de déploiement.

**Q 15.** Déterminer la vitesse  $\dot{\theta}_1$  du moteur  $M_1$  en fonction de la vitesse radiale  $\dot{R}_W$  souhaitée, des paramètres géométriques du robot et de sa position angulaire  $\theta_1$ .

FIGURE 8 – **Document réponse** : Tracé de la loi de vitesse en trapèze.

# Partie II – Goniomètre à actionneurs piézo-électriques

## 1 Présentation du système

### 1.1 La radiocristallographie

La cristallographie par rayons X ou radiocristallographie est une méthode d'analyse de la matière qui consiste à analyser la diffraction d'un faisceau lumineux (de fréquence typique de  $10^{16}$  à  $10^{19}$  Hz) par un échantillon cristallin. Ce procédé est très utilisé en biologie pour déterminer la structure des molécules du vivant. Dans ce cadre, un monocristal de la molécule est placé dans un faisceau de rayons X monochromatiques et la diffraction observée pour différentes positions du cristal dans le faisceau de rayons X permet de déterminer non seulement la structure du cristal, mais aussi et surtout la structure de la molécule.

### 1.2 Le goniomètre SmarGon

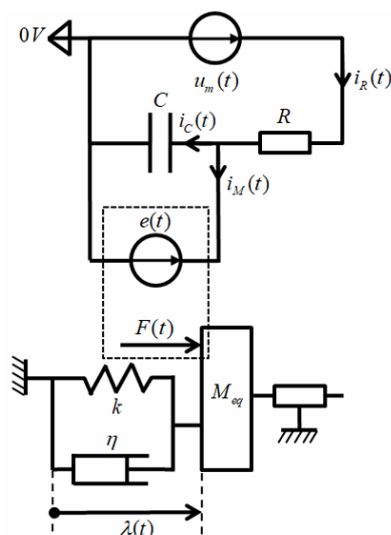
Le positionnement de l'échantillon doit être très précis : il est réalisé par un équipement appelé goniomètre et correspond à une structure robotique à 6 degrés de liberté. Le SmarGon (de la société SmarAct GmbH), présenté sur la FIGURE 9, est un goniomètre de dernière génération qui utilise une structure mécanique mixte série-parallèle et qui permet d'atteindre des précisions inférieures à  $10^{-3}$  degré de position angulaire et inférieure à 5 nm de position linéaire.



FIGURE 9 – Structure du goniomètre SmarGon et paramétrage des six degrés de liberté de l'échantillon

**Q 16.** À l'aide du diagramme de blocs internes (ibd) donné en **Annexe**, compléter sur le **document-réponse** la chaîne de puissance de la rotation d'angle  $\theta$  du goniomètre SmarGon.

## 2 Validation des exigences de stabilité et de précision de l'actionneur piézo-électrique



On modélise l'actionneur piézo-électrique afin d'étudier les performances intrinsèques de la chaîne de puissance de la rotation d'angle  $\theta$ .

L'actionneur installé sur le goniomètre SmarGon est un actionneur linéaire piézo-électrique. Cette technologie est utilisée afin d'avoir le niveau de précision souhaité. L'actionneur linéaire utilisé dans le SmarGon est un actionneur pas-à-pas. Chaque pas de déplacement est créé en utilisant le principe inverse de l'effet piézo-électrique. Pour cela, le matériau utilisé dans la conception de l'actionneur est une céramique, constituée en multi-couches. Ces couches sont polarisées et recouvertes d'électrodes afin d'appliquer un champ électrique d'excitation. Sous l'effet de ce champ, le matériau piézo-électrique répond par une déformation qu'il faut ensuite utiliser pour créer un petit déplacement, appelé pas.

Le modèle électro-mécanique proposé pour cette étude est représenté ci-contre.

La masse  $M_{eq}$  représente la masse équivalente de la chaîne de transmission ramenée sur l'actionneur. La force extérieure due aux poids des différentes pièces du mécanisme de la structure terminale n'est pas prise en compte, car influençant peu le comportement dynamique étudié ici. Le paramètre  $\lambda(t)$  représente le déplacement d'un actionneur piézo-électrique.

Pour la conversion électro-mécanique associée à l'effet piézo-électrique du matériau, le modèle de connaissance est régi par les équations suivantes. Nous supposons qu'à l'instant initial, toutes les grandeurs temporelles sont nulles :

$$u_m(t) = -Rk_i \frac{d\lambda(t)}{dt} + \frac{RC}{k_i} \frac{dF(t)}{dt} + \frac{F(t)}{k_i} \quad (1)$$

$$M_{eq} \frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} = -k\lambda(t) - \eta \frac{d\lambda(t)}{dt} + F(t) \quad (2)$$

$$v(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (3)$$

$k_i = 4 \text{ N/V}$  est appelée la constante de force de l'actionneur et dépend des composites utilisés ainsi que de la géométrie des moteurs.  $F(t)$  représente la force exercée par l'actionneur linéaire sur la masse équivalente  $M_{eq}$ .

**Q 17.** Compléter le schéma-blocs du **document-réponse** en indiquant les fonctions de transfert des blocs manquants.

Une étude numérique a permis d'obtenir les pôles de la fonction de transfert  $H(p) = \frac{\lambda(p)}{U_m(p)}$ . Ces pôles sont représentés dans le plan complexe ( $Re$ ,  $Im$ ) sur la FIGURE 10 suivante.

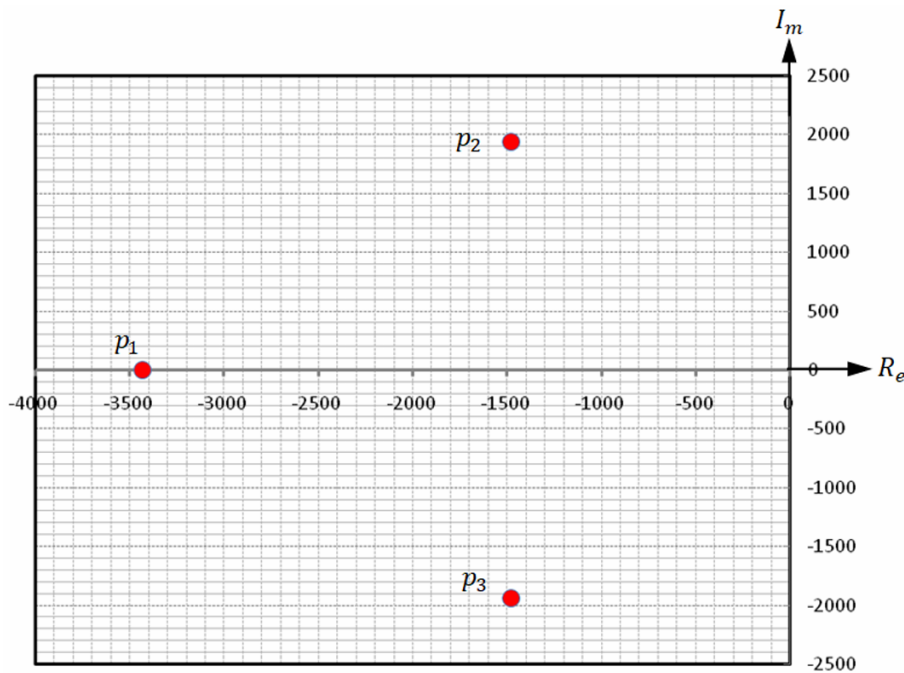


FIGURE 10 – Lieu des pôles de la fonction de transfert  $H(p)$  dans le plan complexe.

**Q 18.** Donner les valeurs des pôles  $p_i$  de la fonction de transfert  $H(p)$ . Conclure sur la stabilité de l'actionneur piézo-électrique.

**Q 19.** Justifier que l'on peut écrire la fonction de transfert  $H(p) = \frac{H_0}{(1 + \tau_e p) \left( 1 + \frac{2\xi}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2} \right)}$ . Indiquer les expressions littérales des paramètres  $\tau_e$ ,  $\xi$  et  $\omega_0$  en fonction des pôles  $p_i$ .

**Q 20.** Discuter de la possibilité de réduire l'ordre de  $H(p)$ .



### 3 Chaîne cinématique de la rotation d'angle $\theta$

La rotation d'angle  $\theta$  de l'échantillon est réalisée par la structure « parallèle » à barres en utilisant deux des actionneurs piézo-électriques étudiés précédemment. Comme le montre le schéma cinématique FIGURE 11, les actionneurs motorisent les barres 2 et 4 qui translatent par rapport au bâti 1, leur mouvement étant transmis à l'échantillon 5 par l'intermédiaire de la barre 3.

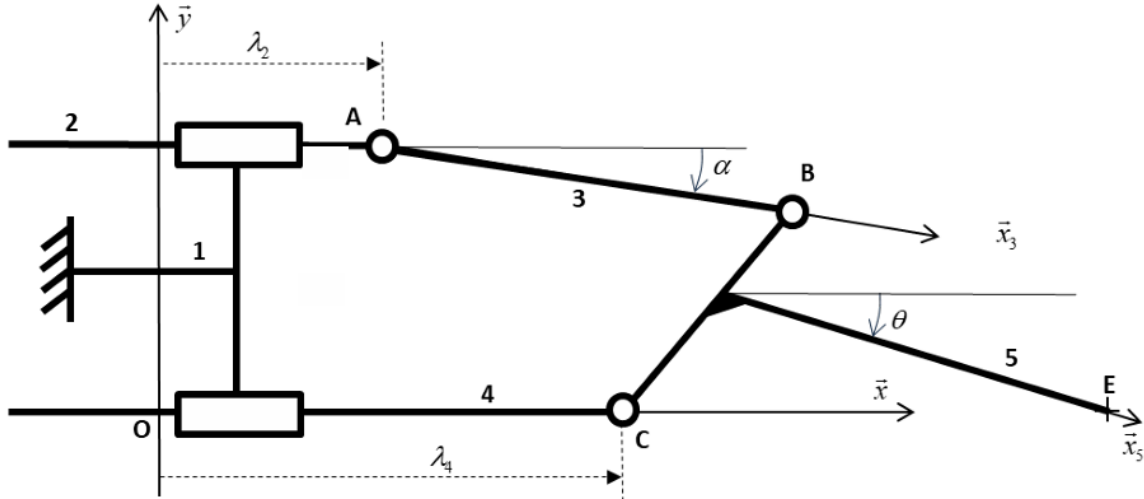


FIGURE 11 – Schéma cinématique de la structure parallèle.

On note  $R(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  le repère fixe associé au bâti 1 et  $B_i(\vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z})$  une base orthonormée directe associée à chaque solide  $S_i$ . On utilise les notations suivantes pour les paramètres géométriques du mécanisme :

$$\begin{aligned}
 - \overrightarrow{OC} &= \lambda_4(t) \vec{x}, & - \overrightarrow{AB} &= l_3 \vec{x}_3, & - \alpha(t) &= (\vec{x}, \vec{x}_3) = (\vec{y}, \vec{y}_3), \\
 - \overrightarrow{OA} &= \lambda_2(t) \vec{x} + e \vec{y}, & - \overrightarrow{CB} &= b \vec{x}_5 + c \vec{y}_5, & - \theta(t) &= (\vec{x}, \vec{x}_5) = (\vec{y}, \vec{y}_5).
 \end{aligned}$$

L'objectif de cette partie est de trouver la relation entre  $\Delta\lambda(t) = \lambda_4(t) - \lambda_2(t)$  et  $\theta(t) = (\vec{x}, \vec{x}_5) = (\vec{y}, \vec{y}_5)$  afin de déterminer les lois de commandes des actionneurs piézo-électriques.

**Q 21.** En écrivant  $\overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC} + \overrightarrow{CO} = \vec{0}$ , déterminer une équation du 2<sup>nd</sup> degré de la forme :  $\Delta\lambda^2 + B(\theta)\Delta\lambda + C(\theta) = 0$  où  $B(\theta)$  et  $C(\theta)$  sont deux fonctions de  $\theta$  à expliciter.

Indication : Il est utile de se rappeler que  $\cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2 = 1$  pour « supprimer » le paramètre intermédiaire  $\alpha(t)$ .

Par résolution numérique sous Python de l'équation précédente pour  $\theta \in [0^\circ, -90^\circ]$  correspondant à la plage de fonctionnement possible du goniomètre, on obtient la loi entrée-sortie de la structure parallèle, représentée sur la FIGURE 12.

On note  $H_{cn}(p) = \frac{\theta(p)}{\Delta\lambda(p)}$ , la fonction de transfert de la structure parallèle à barres.

**Q 22.** Proposer un modèle de comportement de  $H_{cn}(p)$  autour du point de fonctionnement du goniomètre. Vous préciserez la valeur numérique associée au gain statique  $K_{cn}$  de cette fonction de transfert.

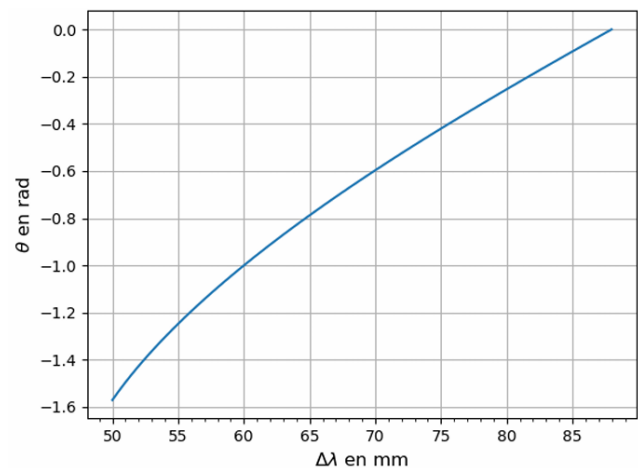
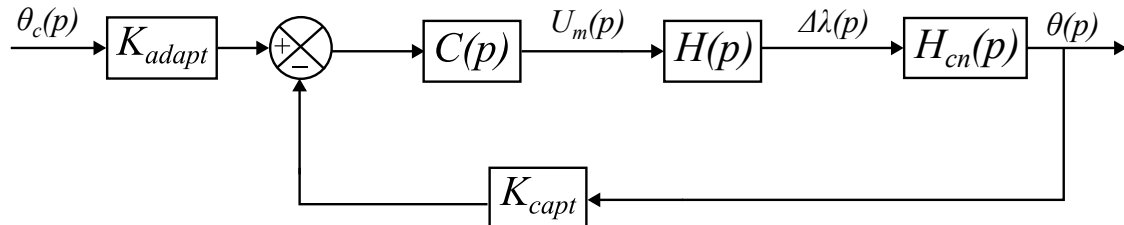


FIGURE 12 – Loi entrée-sortie  $\theta(t) = f(\Delta\lambda(t))$ .

## 4 Optimisation des performances de l'asservissement de rotation d'angle $\theta$

On réalise un asservissement en mesurant l'angle  $\theta(t)$  de l'échantillon à l'aide d'une centrale inertielle de gain  $K_{capt} = 1$ . La consigne d'angle est convertie en tension par un convertisseur angle-tension de gain  $K_{adapt}$ . L'écart  $\varepsilon(t)$  entre la consigne d'angle convertie  $u_c(t)$  et la mesure de l'angle  $u_\theta(t)$  est corrigé par un correcteur de fonction de transfert  $C(p)$  qui délivre la tension de commande  $u_m(t)$  aux actionneurs piézo-électriques.

Le schéma-blocs de cet asservissement est le suivant, où  $K_{capt} = K_{adapt}$  afin d'avoir un « bon » asservissement :



Une étude temporelle montre qu'un correcteur proportionnel  $C(p) = K_p$  ne permet pas d'atteindre des performances conformes aux valeurs définies par le cahier des charges.

On choisit alors d'utiliser un correcteur proportionnel à avance de phase de la forme :  $C(p) = K_p \frac{1 + a\tau p}{1 + \tau p}$  avec  $a > 1$ .

Le réglage de ce correcteur doit permettre de respecter simultanément le critère de rapidité ( $\omega_{0dB} = 8000 \text{ rad/s}$ ) et une marge de phase de  $30^\circ$ .

Pour ce type de correcteur, on peut montrer que pour la pulsation  $\omega_{max} = \frac{1}{\tau\sqrt{a}}$ , on obtient une phase maximale  $\phi_{max} = \arg(C(j\omega_{max}))$  tel que  $\sin(\phi_{max}) = \frac{a-1}{a+1}$ .

**Q 23.** Justifier que la FTBO de cet asservissement est  $H_{BO}(p) = K_{adapt}C(p)H(p)H_{cn}(p)$ .

On donne en **Annexe** les diagrammes de Bode asymptotiques et réels (allures) de ce correcteur  $C(p)$  ainsi que les diagrammes de Bode de la fonction de transfert  $K_{adapt}H(p)H_{cn}(p)$ .

On rappelle que la marge de phase d'un système asservi vaut :  $M_\varphi = \varphi(\omega_{0dB}) + 180^\circ$  où  $\omega_{0dB}$  est la pulsation pour laquelle la FTBO a un gain de 0 dB.

**Q 24.** Déterminer la valeur de  $\phi_{max}$  permettant de respecter la marge de phase sachant que la pulsation de coupure à 0dB,  $\omega_{0dB}$ , souhaitée de la FTBO est de 8000 rad/s.

**Q 25.** Donner les expressions littérales de  $a$  et  $\tau$  en fonction de  $\phi_{max}$  et  $\omega_{0dB}$ .

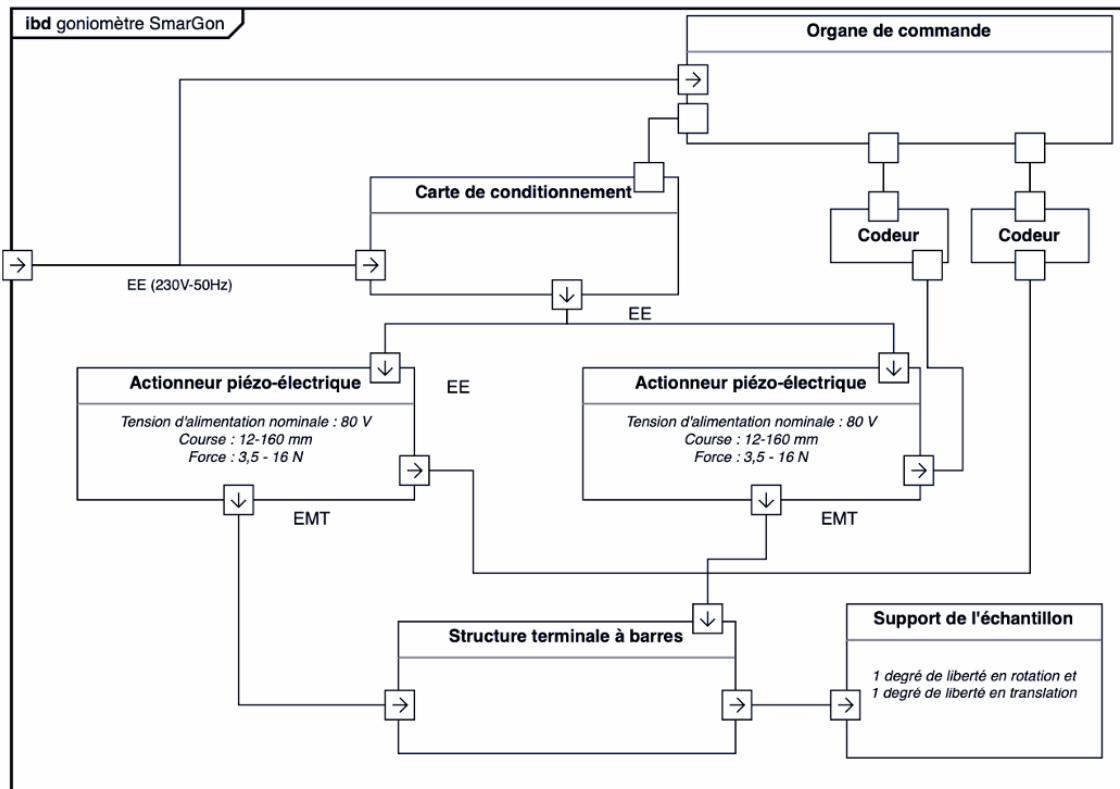
**Q 26.** En déduire la relation entre  $a$  et  $K_p$  définissant la valeur de  $K_p$  qui permet effectivement d'atteindre une pulsation de coupure à 0dB souhaitée de la FTBO.

**Q 27.** Que peut-on dire de la marge de gain du système ainsi corrigé ? Est-il stable ? Justifier.

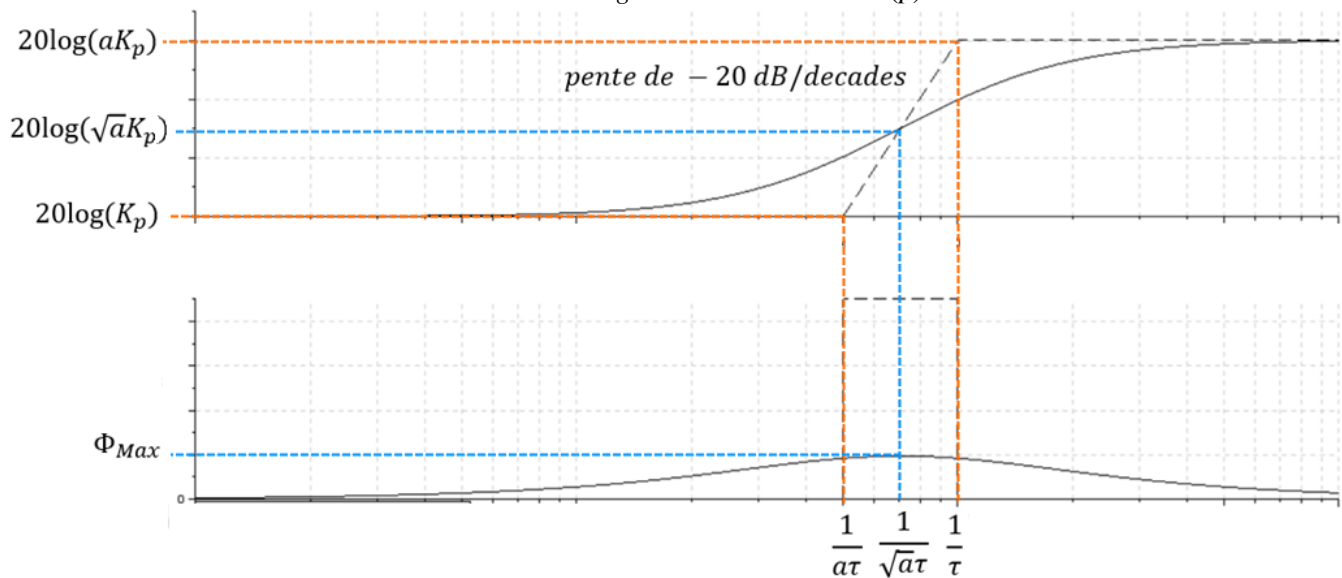
On peut donc maintenant considérer que le correcteur a été entièrement identifié afin d'atteindre les performances souhaitées au regard du cahier des charges fonctionnel.



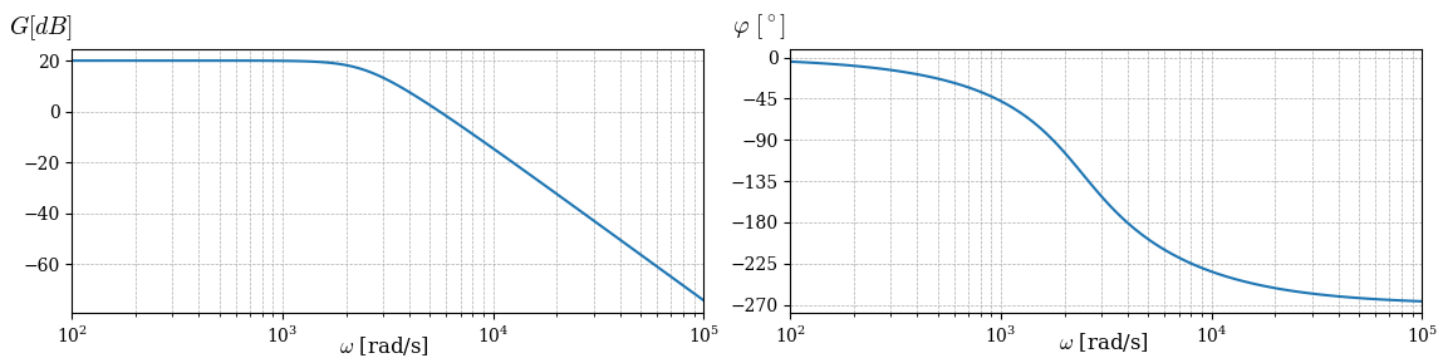
## Goniomètre SmarGon à actionneurs piézo-électriques - Annexes



Allure des diagrammes de Bode de  $C(p)$

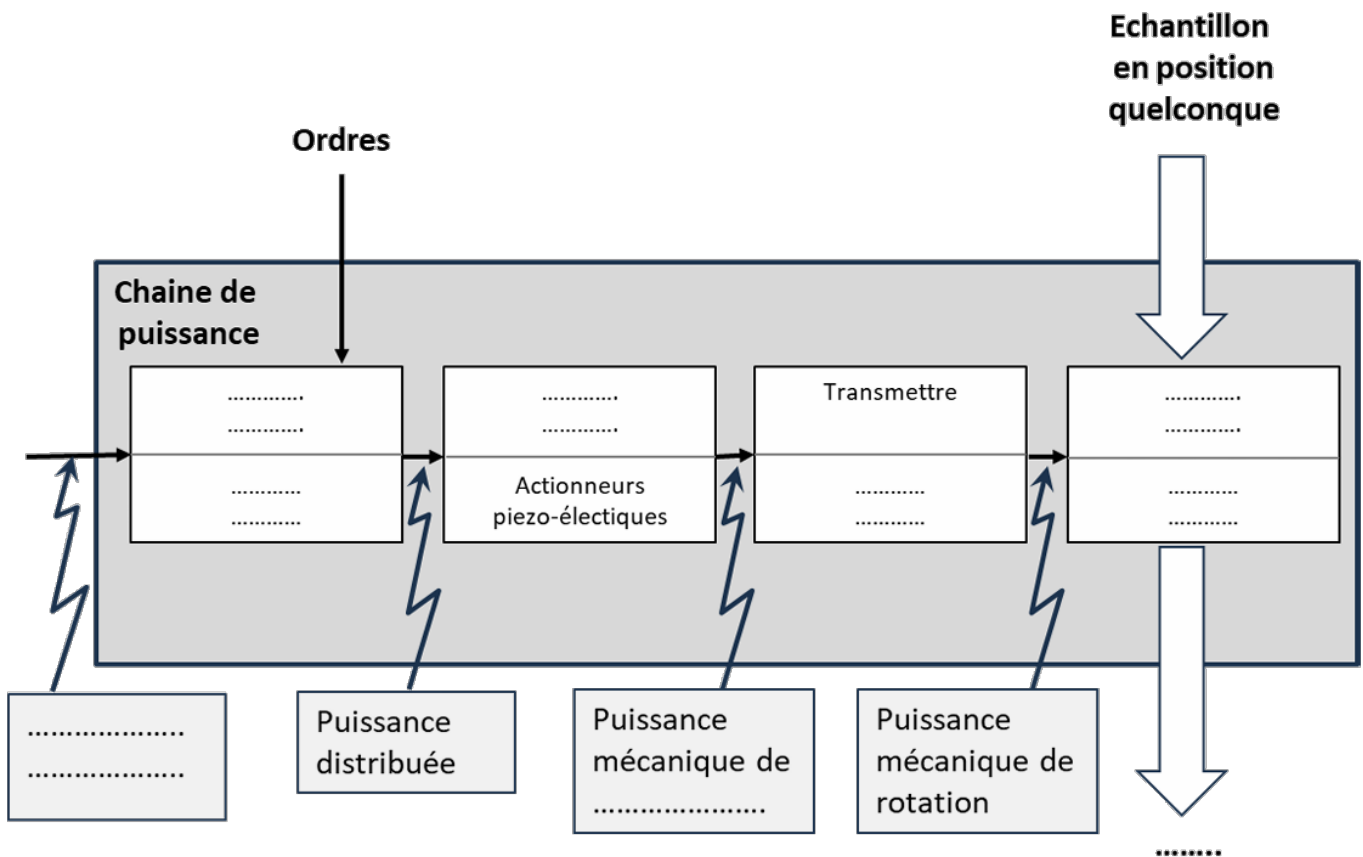


Diagrammes de Bode de  $K_{adapt}H(p)H_{cn}(p)$



## Goniomètre SmarGon à actionneurs piézo-électriques - Document Réponses (DR)

### Question 16 :



### Question 17 :

