

# MP, DS de SI

## Mercredi 29 mars 2023

### Durée : 4h

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

Ce DS comporte :

- ✓ Un sujet, pages 2 à 14.
- ✓ Des annexes, pages 15 à 19.
- ✓ Un document réponse, 2 pages, pour les questions 28, 30 et 34.

# Plate-forme DRoPiC pour l'étude du clavecin

La **partie I** présente le contexte et les exigences du système étudié.

La **partie II** porte sur la modélisation cinématique et l'architecture générale du système.

La **partie III** porte sur la détermination de l'effort à fournir par le système.

La **partie IV** porte sur la modélisation dynamique du système.

La **partie V** porte sur le réglage de l'asservissement du système.

La **partie VI** présente les résultats expérimentaux.

## Partie I - Présentation du contexte et des exigences du robot

### I.1 - Robots d'étude des instruments

Dans le domaine musical, la robotique est utilisée pour deux cas d'application distincts :

- jouer d'un ou de plusieurs instrument(s) de musique pour les robots musiciens ;
- reproduire les gestes musicaux pour les robots d'étude des instruments.

Selon les cas, les robots développés peuvent être inspirés de l'être humain (anthropomorphes) ou d'architecture plus libres.

Les robots d'étude des instruments permettent d'analyser et de comprendre l'interaction complexe qui existe entre le musicien et son instrument, en réalisant de nombreuses mesures, afin d'en extraire les paramètres pertinents. Il s'agit notamment de quantifier et de reproduire les sollicitations des instruments, par exemple la pression et le débit pour les instruments à vents ou encore le déplacement et la vitesse pour les instruments à cordes. L'étude se focalisera ici sur le clavecin, instrument à cordes pincées et à clavier. L'enfoncement des touches du clavier du clavecin permet d'actionner un sautereau, qui vient alors pincer la corde (**figure 1**).

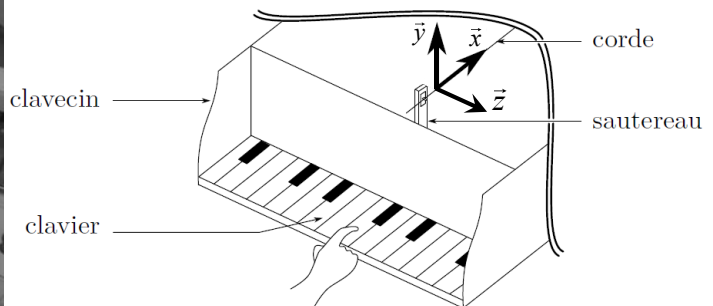


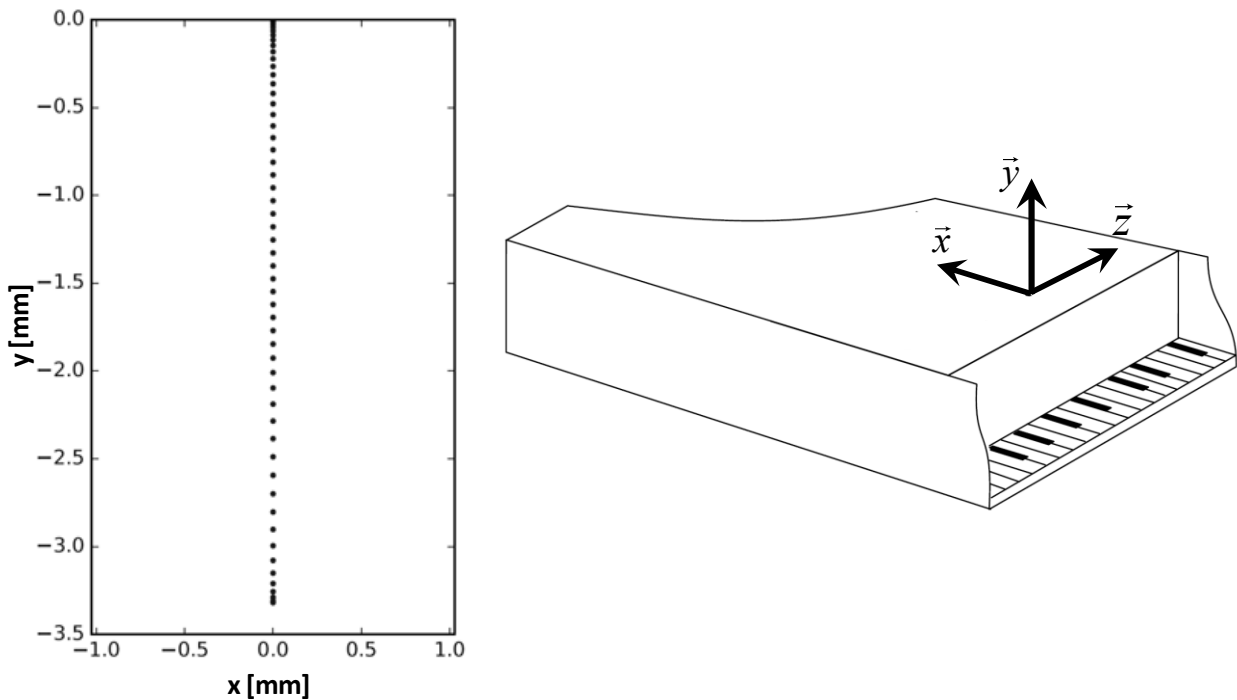
Figure 1 - Clavecin

Les robots d'étude sont capables :

- de générer les trajectoires réalistes d'un doigt de joueur de clavecin, ce qui permet plutôt d'analyser les efforts articulaires mis en jeu dans le doigt pendant un morceau de musique ;
- d'imposer directement les conditions initiales idéales, indépendamment des trajectoires, ce qui permet d'obtenir un outil juste et répétable d'étude du clavecin, utilisable par exemple pour son harmonisation (processus de réglage).

## I.2 - Exigences de la plate-forme robotisée

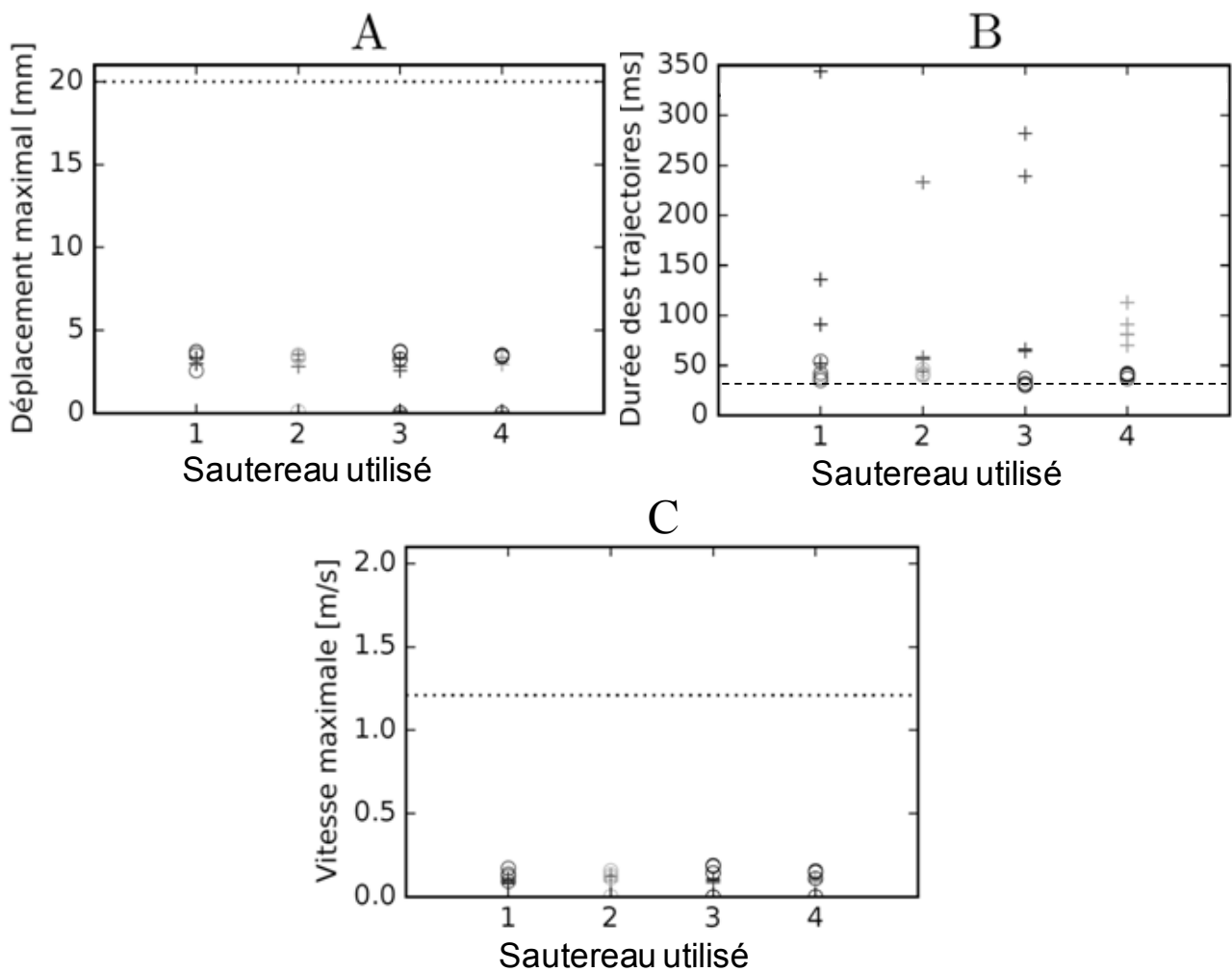
Des mesures ont été réalisées sur une musicienne jouant du clavecin afin de déterminer les performances attendues du robot d'étude. Le geste de la claveciniste selon  $\vec{z}$  n'a aucune influence sur l'élévation du sautereau (**figure 1**). Les mouvements utiles à reproduire sont donc contenus dans le plan  $(\vec{x}, \vec{y})$  ; un robot plan est alors suffisant. De plus, l'orientation du doigt n'est pas prise en compte dans ces expériences, seul l'enfoncement de la touche est mesuré, ce qui correspond à des trajectoires rectilignes (**figure 2**). Néanmoins, le choix de deux degrés de liberté pour le robot permettra son utilisation pour d'autres instruments à cordes pincées, telle la harpe.



**Figure 2** - Exemple de trajectoire sur le clavecin dans le plan  $(\vec{x}, \vec{y})$

Pour deux tempos différents, les trajectoires de jeu ont été mesurées par vibromètre laser au niveau de la touche du clavecin pour quatre sautereaux (**figure 3**). Les données de la campagne de mesures ont été analysées afin d'établir le diagramme SysML partiel des exigences selon 5 critères (**figure 13, annexe 1**). On peut noter sur le graphique A de la **figure 3** que l'enfoncement de la touche ne dépasse pas 5 mm.

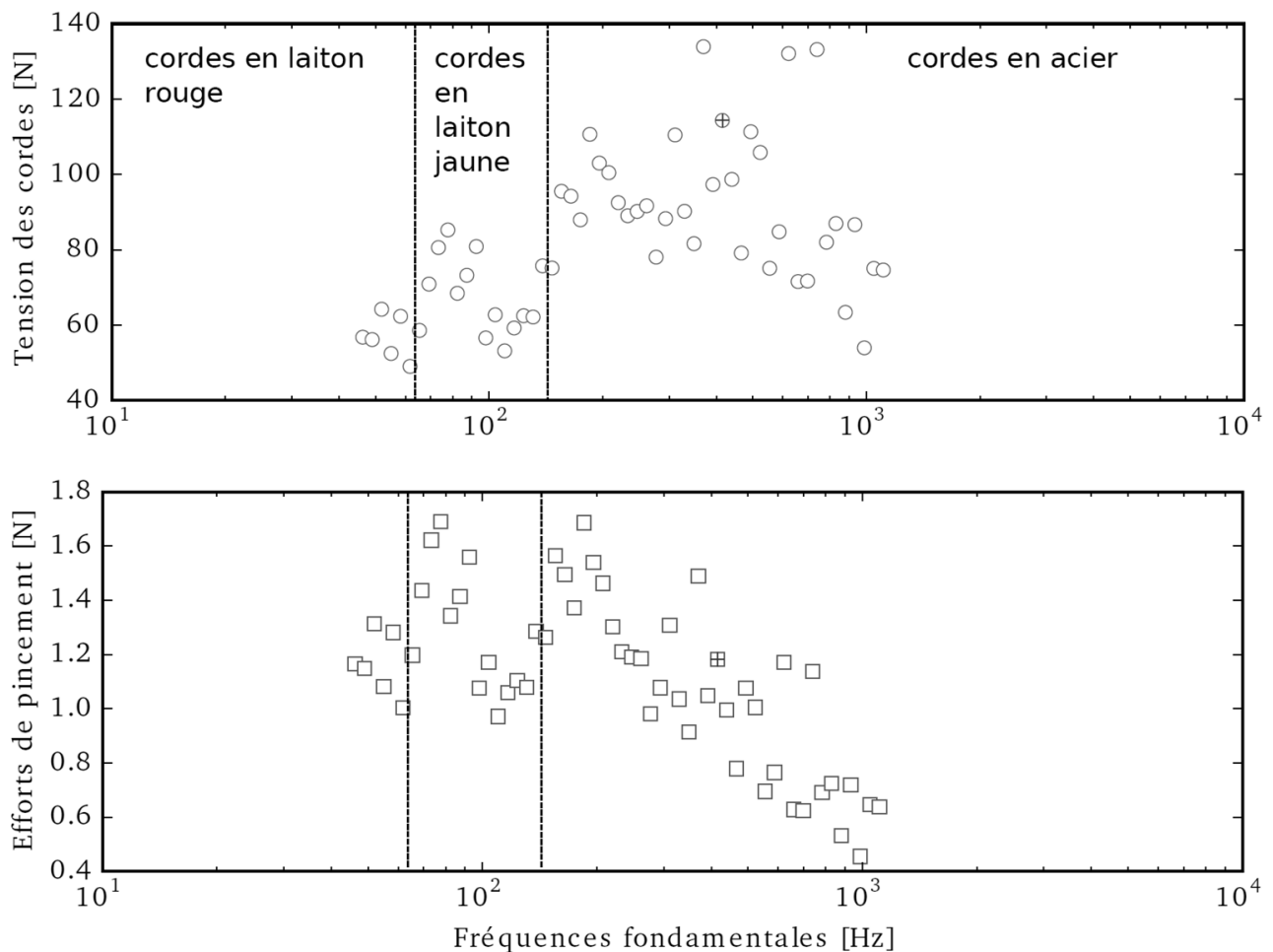
Le critère de surface de travail du robot est basé sur le déplacement maximal en considérant qu'elle correspond à l'aire d'un carré dont le côté est le déplacement maximal (graphique A de la **figure 3**). Le critère de durée des trajectoires (graphique B de la **figure 3**) est déterminant afin de fixer une limite supérieure à la période d'échantillonnage de la commande du robot, permettant de reproduire avec une précision suffisante les trajectoires mesurées.



**Figure 3** - Caractéristiques des trajectoires mesurées sur une claveciniste en situation de jeu, pour 4 sautereaux numérotés de 1 à 4 et pour deux tempos différents (les marqueurs '+' correspondent à un tempo lent de 230 battements par minute et les marqueurs 'o' à un tempo rapide de 440 bpm). Les traits en pointillés correspondent aux valeurs retenues des exigences.

**Q1.** À partir du diagramme SysML des exigences (**figure 13, annexe 1**) et de la **figure 3**, conclure quant au choix du niveau des critères de surface de travail, de durée des trajectoires et de vitesse maximale de l'effecteur.

La **figure 4** présente les estimations des tensions des cordes et des efforts de pincement, pour différents matériaux de cordes, en fonction des fréquences fondamentales. La corde n'est pas excitée directement par le robot mais par l'intermédiaire du mécanisme touche-sautereau. L'étude qui sera menée **partie III** permettra d'en déduire l'effort de contact entre le doigt du robot et la touche du clavecin.



**Figure 4** - Tension des cordes (marqueurs 'o') et efforts de pincement (marqueurs '□') en fonction des fréquences fondamentales (le point mis en évidence '+' correspond à la corde n°37)

## Partie II - Architecture du robot DRoPiC et modèles géométrique et cinématique

Les modèles géométrique et cinématique, ainsi que les données utiles à la résolution des questions de cette **partie**, sont représentés en **annexes 2** et **3**.

Le robot DRoPiC, schématisé **figure 5**, est constitué de deux doigts notés 1 et 2.

Le doigt 1 est en liaison pivot avec le bâti 0 d'axe  $(O_1, \vec{z}_0)$ , il dispose donc d'un degré de liberté noté  $\theta_1(t)$  par rapport à 0. La rotation est actionnée par un motoréducteur 1 exerçant un couple  $C_{r1} \vec{z}_0$  sur le doigt 1.

Le doigt 2 est en liaison pivot avec le doigt 1 d'axe  $(O_2, \vec{z}_0)$ , il dispose donc d'un degré de liberté noté  $\theta_2(t)$  par rapport à 0. La rotation est actionnée par un motoréducteur 2 exerçant un couple  $C_{r2} \vec{z}_0$  sur le doigt 2 par l'intermédiaire d'une transmission à poulies-courroie. Le stator du groupe motoréducteur 2 est donc solidaire du bâti 0.

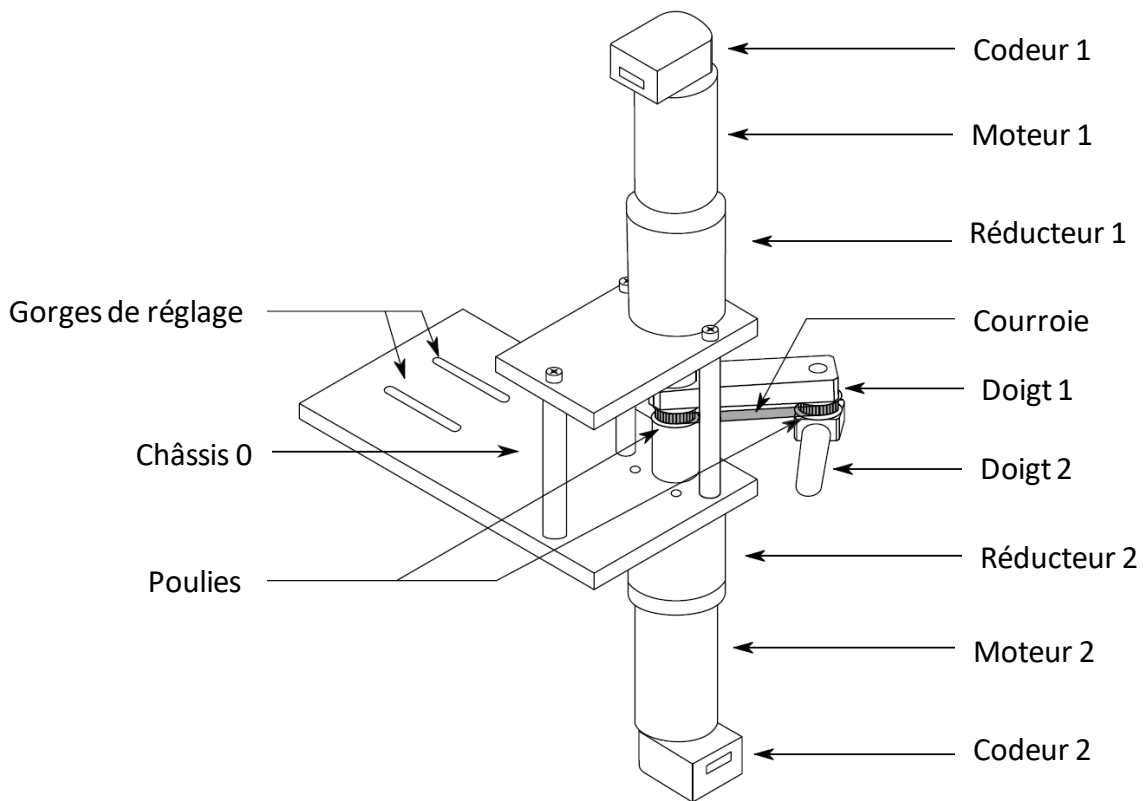


Figure 5 - Schéma d'ensemble du robot DRoPiC

## II.1 - Validation de l'exigence de surface de travail

Afin de limiter les interférences avec l'environnement de travail du robot, l'espace dans lequel les doigts 1 et 2 du robot évoluent est limité par deux butées représentées sur le **document réponse**. L'ensemble des points constituant les doigts 1 et 2 (seuls les segments  $[O_1O_2]$  et  $[O_2P]$  seront pris en compte) doivent être contenus entre les deux droites  $(O_1, \vec{x}_0)$  et  $(O_1, \vec{y}_0)$ .

**Q2.** Représenter, ~~sur le document réponse à l'échelle 1:2,~~ l'enveloppe de la surface atteignable par le point  $P$ , extrémité du doigt 2. Déterminer l'aire de travail du robot et conclure quant au respect de l'exigence de surface de travail.

## II.2 - Modèles géométriques et cinématiques

On se reportera à la **figure 15, annexe 2** et à l'**annexe 3** pour le modèle cinématique et les données et paramétrages utiles.

On note  $x(t)$  et  $y(t)$  les coordonnées cartésiennes du point  $P$  telles que :

$$\overrightarrow{O_1P} = x(t)\vec{x}_0 + y(t)\vec{y}_0.$$

Il est courant en robotique de nommer les angles  $\theta_1(t)$  et  $\theta_2(t)$  les coordonnées articulaires du robot. La commande de trajectoire du point  $P$  nécessite d'établir un modèle géométrique et cinématique entre les coordonnées articulaires et cartésiennes du robot. On cherche alors un modèle sous la forme ci-dessous, où  $[J]$  est appelée matrice jacobienne du modèle :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} = [J] \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1(t) \\ \dot{\theta}_2(t) \end{bmatrix}.$$

**Q3.** Exprimer la matrice jacobienne  $[J]$  en fonction de  $l_1, l_2, \theta_1(t)$  et  $\theta_2(t)$ .

**Q4.** Exprimer la norme de la vitesse  $\|\vec{V}(P,2/0)\|$  notée  $V_P$  en fonction de  $l_1, l_2, \theta_1(t), \theta_2(t)$  et leurs dérivées.

### II.3 - Validation de l'exigence de vitesse maximale

Les caractéristiques des groupes motoréducteur 1 et 2 sont données **figure 14, annexe 1**.

La vitesse maximale du point  $P$  dans son mouvement par rapport au bâti 0 doit pouvoir être atteinte lorsque chaque moteur fonctionne seul ( $\omega_{m1}(t) = 0$  si  $\omega_{m2}(t) \neq 0$  et vice-versa). On considère de plus que la situation la plus défavorable correspond à la situation où seul le doigt 2 est actionné.

**Q5.** Déterminer la relation entre la vitesse de rotation  $\omega_{m2}$  de l'axe moteur et la norme de la vitesse  $V_P$  du point  $P$ .

**Q6.** Dédire des questions précédentes si l'exigence de vitesse maximale peut être vérifiée par les moteurs.

### II.4 - Validation de l'exigence de résolution spatiale

Les caractéristiques des groupes motoréducteur 1 et 2 sont données **figure 14, annexe 1**.

On définit ici la résolution spatiale notée  $\Delta_p$  (en mètre) comme la distance parcourue par le point  $P$  entre deux incréments successifs des codeurs. On définit la résolution des codeurs notée  $\Delta\theta_{Ci}$  (en radian) comme la plus petite variation angulaire détectable par le codeur sur l'axe moteur.

**Q7.** On considère tout d'abord que seul le doigt 2 est actionné ; le doigt 1 est donc immobile. Établir la relation entre la résolution spatiale notée  $\Delta_p$  et la résolution du codeur lié au doigt 2 notée  $\Delta\theta_{C2}$ . Conclure quant au respect de l'exigence.

**Q8.** En considérant maintenant la situation "doigts tendus"  $\theta_1(t) = \theta_2(t)$ , établir la relation entre la résolution spatiale notée  $\Delta_p$  et la résolution du codeur lié au doigt 1 notée  $\Delta\theta_{C1}$ . Conclure quant au respect de l'exigence.

## Partie III - Modèle du mécanisme d'excitation de la corde : détermination de l'effort de contact

La touche et le sautereau du clavecin seront notés respectivement 3 et 4. On s'intéresse dans cette **partie** à la détermination de l'effort de contact entre la touche 3 et le doigt 2. On considère que le contact se fait au niveau de l'extrémité du doigt 2, le point  $P$  est donc confondu avec le point  $A$ , point d'application de l'effort de contact. Le modèle de l'ensemble étudié est présenté **figure 16, annexe 2** et en **annexe 3**.

On isole l'ensemble  $E$  constitué de la touche 3 et du sautereau 4. Les liaisons entre solides sont considérées comme parfaites.

**Q9.** Exprimer l'énergie cinétique  $E_c(4/0)$  du sautereau 4 par rapport au bâti 0 en fonction du paramètre cinématique  $\dot{y}_4(t)$  et des autres données utiles.

**Q10.** Exprimer l'énergie cinétique  $E_c(3/0)$  de la touche 3 par rapport au bâti 0 en fonction du paramètre cinématique  $\dot{\theta}_3(t)$  et des autres données utiles.

**Q11.** Exprimer l'énergie cinétique  $E_c(E/0)$  de l'ensemble  $E$  par rapport au bâti 0 en fonction des paramètres cinématiques  $\dot{\theta}_3(t)$ ,  $\dot{y}_4(t)$  et des autres données utiles.

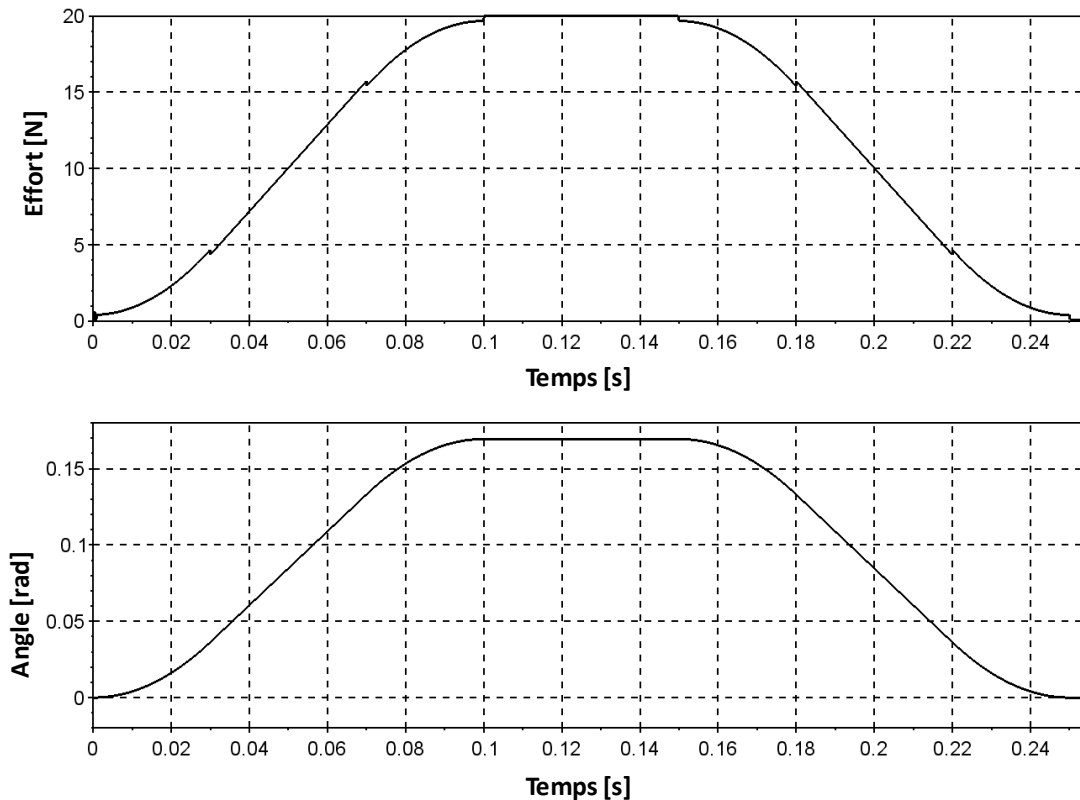
**Q12.** Exprimer la puissance  $P_{\text{int}}$  des inter-efforts de l'ensemble  $E$ .

**Q13.** Exprimer la puissance par rapport au bâti 0 des actions extérieures  $P_{\text{ext} \rightarrow E/0}$  s'exerçant sur l'ensemble  $E$ .

**Q14.** L'angle  $\theta_3(t)$  restant petit au cours du mouvement de la touche, donner une relation linéaire liant  $y_4(t)$  et  $\theta_3(t)$ . Montrer alors que l'on peut obtenir l'équation de mouvement suivante où vous explicitez les termes  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  et  $A_4$  :

$$A_1 \ddot{\theta}_3 + A_2 \theta_3 = A_3 F_t + A_4.$$

On résout numériquement l'équation de mouvement obtenue. La **figure 6** présente le mouvement imposé de l'angle de la touche  $\theta_3(t)$  et l'effort simulé de contact sur la touche.



**Figure 6** - Effort de contact sur la touche et angle de la touche

**Q15.** Commenter la courbe d'effort de contact vis-à-vis des exigences du robot.



## Partie IV - Modèle dynamique du robot DRoPiC

L'objectif de cette **partie** est de réaliser un modèle dynamique du robot afin, d'une part, de prévoir son comportement lorsqu'il est asservi en position et, d'autre part, de valider le choix des groupes motoréducteurs.

On se reportera à la **figure 15, annexe 2** et à l'**annexe 3** pour le modèle cinématique et les données et paramétrages utiles. Les liaisons entre solides sont considérées comme parfaites.

**Q16.** Isoler le solide 2 et exprimer les moments des actions extérieures à l'isolement au point  $O_2$ . On exprimera l'effort de la touche en fonction de  $F_x$  et  $F_y$ .

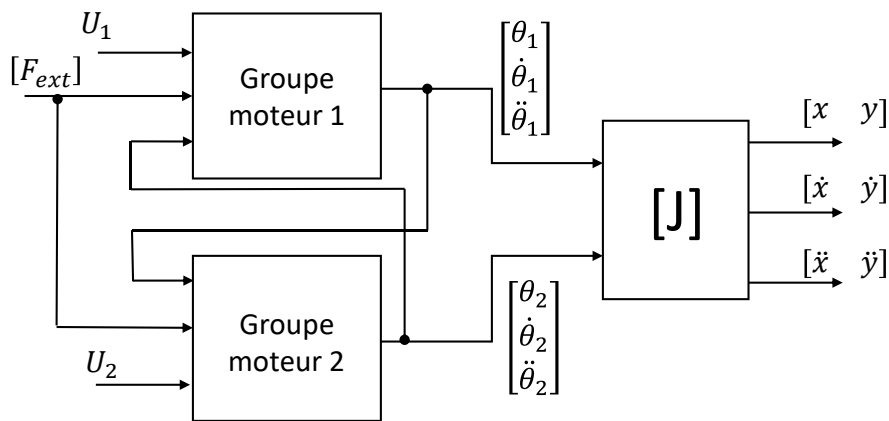
**Q17.** Appliquer au solide 2 le théorème du moment dynamique exprimé au point  $O_2$  en projection sur  $\vec{z}_0$ . En déduire l'expression du couple en sortie du groupe motoréducteur 2  $C_{r2}(t)$ .

Le couple en sortie du groupe motoréducteur 1  $C_{r1}(t)$  s'exprime par :

$$C_{r1}(t) = (I_1 + m_1 c_1^2 + m_2 l_1^2) \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 c_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \ddot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_2^2 + m_1 c_1 \cos(\theta_1) g + m_2 l_1 \cos(\theta_1) g - l_1 \cos(\theta_1) F_y + l_1 \sin(\theta_1) F_x.$$

**Q18.** Expliquer de manière détaillée (système isolé, points et projections éventuels) quel(s) théorème(s) de dynamique permettrai(en)t d'obtenir le plus simplement cette équation.

On obtient alors la structure du modèle représenté **figure 7** ci-dessous. Les entrées du modèle sont les efforts extérieurs dus aux actions de pesanteur et de contact avec la touche, notés  $[F_{ext}]$  et les tensions des groupes motoréducteurs, notées  $U_1$  et  $U_2$ .



**Figure 7** - Modèle de comportement

**Q19.** Expliquer succinctement ce qui rend difficile la résolution des équations associées au modèle de la **figure 7** et quels moyens et/ou hypothèses vous mettriez en œuvre pour les résoudre.

**Q20.** En considérant la situation  $\theta_1(t) = \theta_2(t) = 0 \text{ rad}$  et le réducteur de rendement unitaire, établir l'expression du couple statique  $C_{r1}(t)$  puis du couple statique  $C_{m1}(t)$ .

**Q21.** Conclure quant à la capacité des moteurs à imposer l'effort maximal sur la touche.

## Partie V - Modèle des asservissements du robot DRoPiC

### V.1 - Modèle complet

Afin de suivre les trajectoires de consigne, les deux axes du robot sont commandés par l'intermédiaire d'un asservissement de position articulaire. L'intensité dans les moteurs est contrôlée par une boucle d'asservissement de courant. L'**annexe 4** et la **figure 17, annexe 5** présentent cette structure de commande pour l'axe 2, identique à celle de l'axe 1. Pour toute la **partie V**, l'axe 1 est considéré comme immobile, seul l'axe 2 est en mouvement.

**Q22.** À partir des caractéristiques du réducteur planétaire et du système poulies-courroie données dans le diagramme de définition de blocs (**figure 14, annexe 1** et **figure 15, annexe 2**), déterminer le gain  $R_2$  du transmetteur situé entre l'axe moteur et l'axe 2.

Le réducteur planétaire et le système poulies-courroie sont considérés de rendement unitaire.

**Q23.** À partir des caractéristiques de l'axe 2 données dans le diagramme de définition de blocs (**figure 14, annexe 1**), exprimer l'énergie cinétique  $E_C(\Sigma/0)$  de l'ensemble de l'axe 2 mis en mouvement par le moteur, par rapport au châssis du robot. En déduire l'inertie équivalente  $J_{eq}$  ramenée au moteur. Faire l'application numérique.

**Q24.** À partir des caractéristiques du codeur incrémental données dans le diagramme de définition de blocs (**figure 14, annexe 1**), déterminer le gain  $K_{cod}$  du codeur incrémental.

**Q25.** Exprimer l'écart  $\varepsilon_p(p)$  en sortie du comparateur de l'asservissement de position en fonction de la consigne de position angulaire  $\theta_{2c}(p)$  et de la position angulaire de l'axe 2  $\theta_2(p)$ . En déduire le réglage du gain  $K_{conv}$  du convertisseur de consigne afin d'asservir correctement la position angulaire de l'axe 2. Faire l'application numérique.

### V.2 - Boucle d'asservissement du courant

On s'intéresse dans cette **sous-partie** au réglage et à la validation des performances de l'asservissement du courant du moteur de l'axe 2 (**figure 18, annexe 5**). Le caractère numérique de la baie de commande introduit un échantillonnage de période  $40\mu s$  dans cette boucle d'asservissement, qui est modélisé par un filtre passe-bas (Butterworth d'ordre 4), non représenté sur le schéma bloc (**figure 18, annexe 5**). La correction est réalisée par un correcteur de type proportionnel intégral :

$$C_I(p) = K_{pt} + \frac{K_{it}}{p}.$$

Dans toute cette phase de réglage, le couple de perturbation dû aux actions de pesanteur et de contact avec la touche (phase de fonctionnement) sera considéré comme nul :

$$C_{pert}(p) = 0.$$

**Q26.** À partir du schéma bloc de la commande de l'axe 2 (**figure 17, annexe 5**), déterminer la fonction de transfert du moteur complet, sous forme canonique :

$$M(p) = \frac{I(p)}{U_m(p)}.$$

**Q27.** Le réglage de la boucle d'asservissement du courant est réalisé en bloquant la rotation du moteur ( $\Omega_m(p) = 0$ ). En déduire l'expression simplifiée de la fonction de transfert du moteur :

$$M_{\text{rég}}(p) = \frac{I(p)}{U_m(p)}.$$

Le **document réponse** donne les diagrammes de Bode en gain et en phase de la fonction de transfert en boucle ouverte de l'asservissement de courant en l'absence de correction ( $K_{pl} = 1 \text{ V/A}$  et  $K_{il} = 0 \text{ V/(A}\cdot\text{s)}$ ) et avec rotation bloquée ( $\Omega_m(p) = 0$ ).

**Q28.** À partir de ces diagrammes de Bode, en faisant apparaître clairement les constructions graphiques sur le document, déterminer le réglage du gain proportionnel  $K_{pl}$  afin de respecter l'exigence de marge de gain de la boucle de courant du diagramme des exigences (**figure 13, annexe 1**). Conclure pour ce réglage quant au respect de l'exigence de marge de phase, en précisant la valeur relevée sur les diagrammes de Bode et en faisant apparaître clairement les constructions graphiques sur le document réponse.

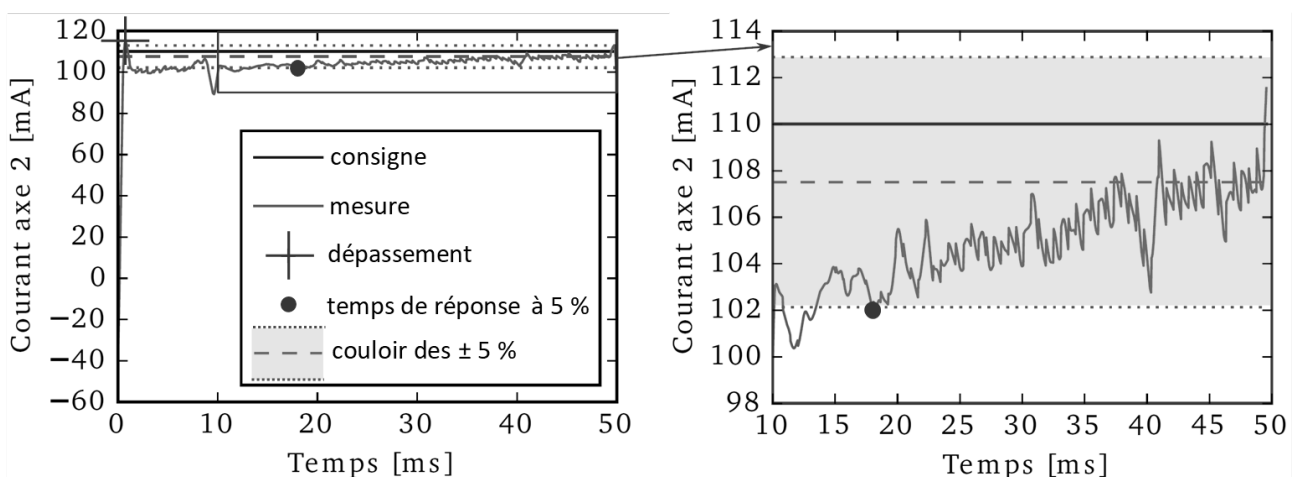
La correction intégrale est ajoutée en fixant le gain intégral par rapport au gain proportionnel réglé, soit  $K_{il} = \frac{4}{7} K_{pl}$ .

**Q29.** Préciser en le justifiant l'exigence (ou les exigences) que permettra (ou permettront) de respecter cet ajout de correction intégrale.

**Q30.** Tracer sur le document réponse les diagrammes asymptotiques de Bode en gain et en phase du correcteur proportionnel intégral  $C_I(p)$ , ainsi que l'allure des diagrammes réels.

**Q31.** Conclure quant à l'effet de l'ajout de l'action intégrale dans le correcteur vis-à-vis du respect des exigences de marges de gain et de phase de la boucle de courant.

La **figure 8** présente la mesure en courant dans le moteur suite à une consigne en échelon.



**Figure 8** - Mesure de courant en réponse à un échelon de 110 mA

**Q32.** En précisant les valeurs, relever sur la **figure 8** les performances mesurées. Comparer aux performances du modèle étudié dans les questions précédentes, ainsi qu'aux performances souhaitées de la boucle de courant du diagramme des exigences (**figure 13, annexe 1**).

### V.3 - Boucle d'asservissement en position

La boucle d'asservissement de courant étant réglée, on s'intéresse dans cette **sous-partie** à la validation des performances de l'asservissement de position du moteur de l'axe 2 (**figure 17, annexe 5**). Le caractère numérique du codeur incrémental et de la baie de commande introduit un échantillonnage de période 1 ms dans cette boucle d'asservissement, qui est aussi modélisé par un filtre passe-bas (Butterworth d'ordre 4), non représenté sur le schéma bloc (**figure 17, annexe 5**).

On considère d'abord que la correction est réalisée par un correcteur de type proportionnel intégral dérivé :

$$C_p(p) = K_{pp} + \frac{K_{ip}}{p} + K_{dp}p.$$

**Q33.** En considérant le système non perturbé ( $C_{pert}(p) = 0$ ), déterminer l'écart statique  $\varepsilon_s$ , suite à une entrée de type échelon, ainsi que l'écart de traînage  $\varepsilon_v$ , suite à une entrée de type rampe. En supposant à présent une perturbation constante ( $C_{pert}(p) \neq 0$ ), préciser en le justifiant l'exigence (ou les exigences) que permettra de respecter l'action intégrale contenue dans le correcteur  $C_p(p)$ . Préciser également l'exigence (ou les exigences) que permettra de respecter l'action dérivée contenue dans le correcteur  $C_p(p)$ .

On considère ensuite que la correction est plutôt réalisée par un correcteur de type proportionnel intégral dérivé approché :

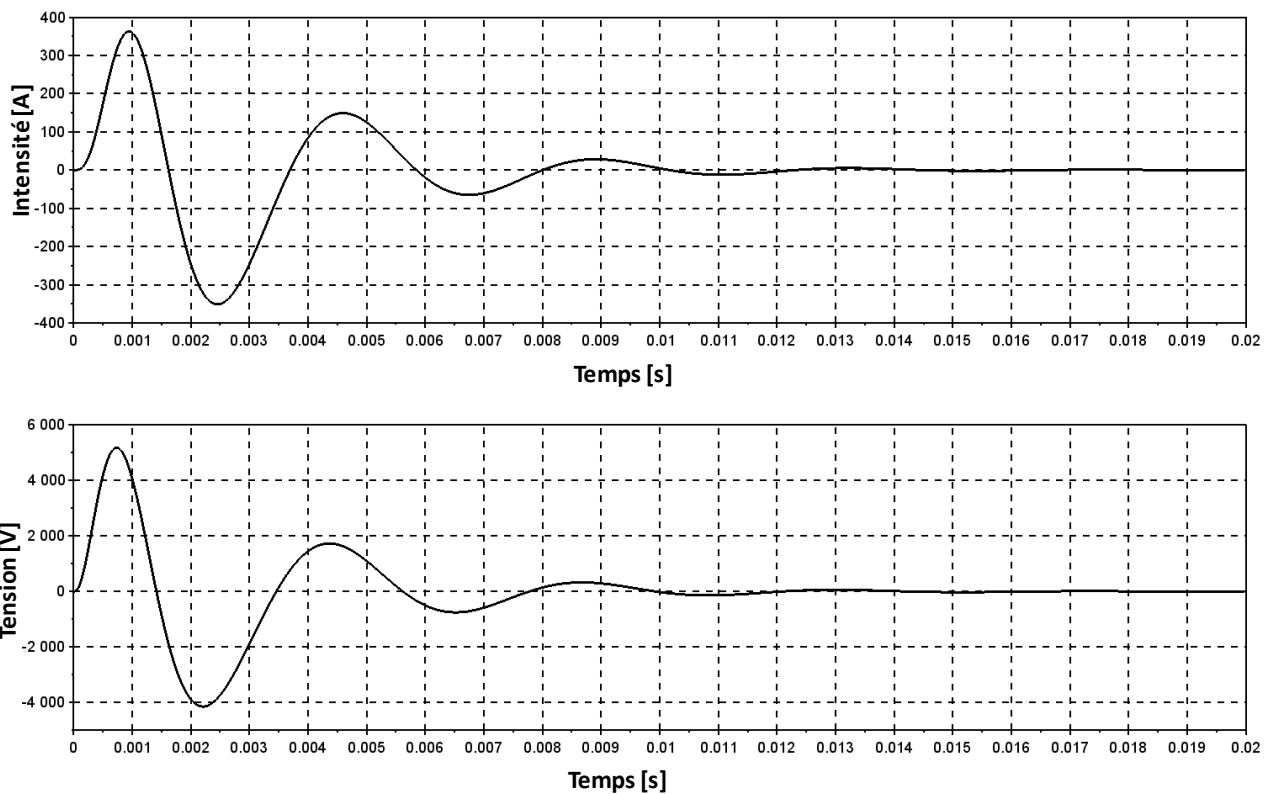
$$C_p(p) = K_{pp} \frac{(1 + \tau_n p)^2}{1 + \tau_d p} \text{ avec } K_{pp} = 0,79 \text{ A/inc}, \tau_n = 0,048 \text{ s et } \tau_d = 1,75 \text{ s}.$$

Le **document réponse** donne les diagrammes de Bode en gain et en phase de la fonction de transfert en boucle ouverte de l'asservissement de position.

**Q34.** À partir de ces diagrammes de Bode, en faisant apparaître clairement les constructions graphiques sur le **document réponse**, déterminer les valeurs des marges de stabilité (gain et phase). Conclure quant au respect des exigences de marges de gain et de phase de la boucle de position du diagramme des exigences (**figure 13, annexe 1**).

La **figure 9** présente les courbes simulées de la tension et de l'intensité au niveau de l'induit du moteur suite à une entrée de type échelon de position de  $20^\circ$ .

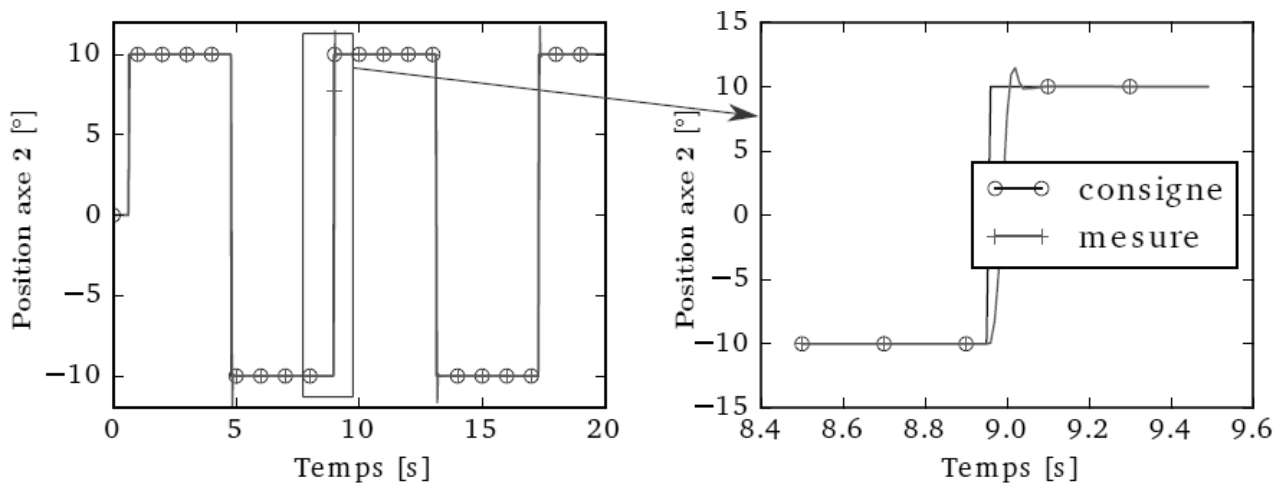
**Q35.** En comparant aux caractéristiques du moteur à courant continu données dans le diagramme de définition de blocs (**figure 14, annexe 1**), analyser les niveaux de tension et d'intensité atteints. Conclure quant à la représentativité du modèle vis-à-vis du fonctionnement du système réel. D'après la structure de commande présentée **figure 17, annexe 5**, préciser le(s) grandeur(s) physique(s) devant faire l'objet d'une limitation (saturation) dans le modèle.



**Figure 9** - Simulation pour un échelon de  $20^\circ$  de position pour la boucle d'asservissement de position

Les **figures 10** et **11** présentent les mesures en position angulaire de l'axe 2 suite à des signaux de consigne respectivement de type carré et de type triangulaire.

**Q36.** En précisant les valeurs, relever sur la **figure 10** les performances mesurées. Comparer aux performances souhaitées de la boucle de position du diagramme des exigences (**figure 13, annexe 1**).



**Figure 10** - Mesure de la position en réponse à un signal carré de  $\pm 10^\circ$

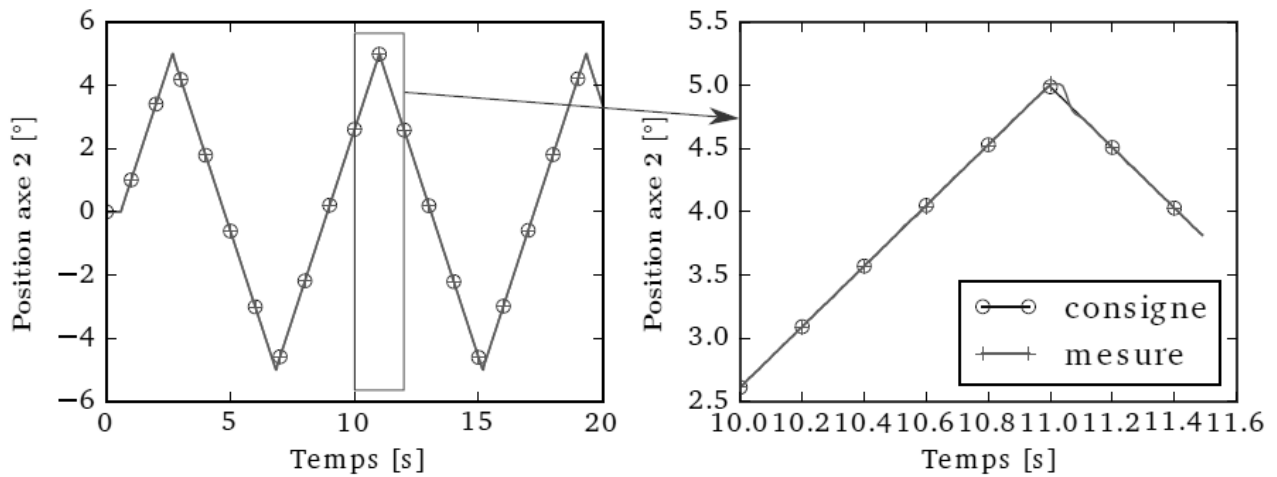


Figure 11 - Mesure de la position en réponse à un signal triangulaire de  $\pm 5^\circ$

## Partie VI - Comparaison avec les essais et validation

Les courbes ci-après **figure 12** donnent le tracé de la consigne et de la réponse du robot correspondant à la trajectoire utilisée pour enfoncer une touche d'un clavecin de 10 mm avec une vitesse de  $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (graphe B) et pour actionner la corde d'une harpe pour jouer un accord (graphe A).

On trace également l'incertitude de mesure avec un coefficient de confiance de 95 %.

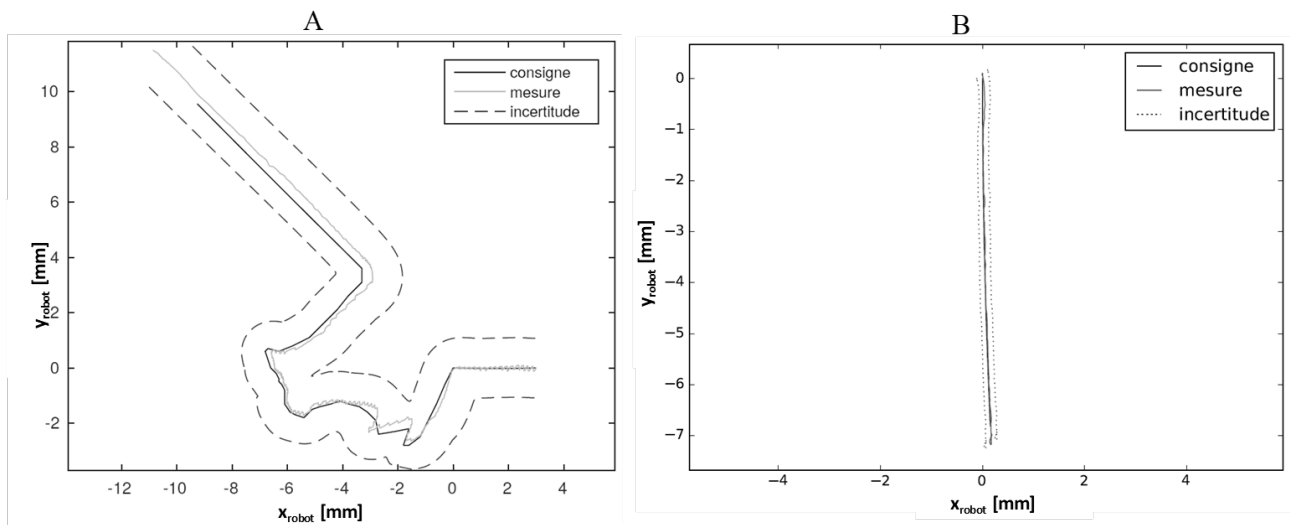


Figure 12 - Mesure de la position en réponse à une consigne d'enfoncement de touche (graphe A pour la harpe et graphe B pour le clavecin)

**Q37.** En analysant les courbes de la **figure 12**, conclure quant aux choix des paramètres effectués dans la **partie V**.

# ANNEXE 1

## Diagrammes SysML

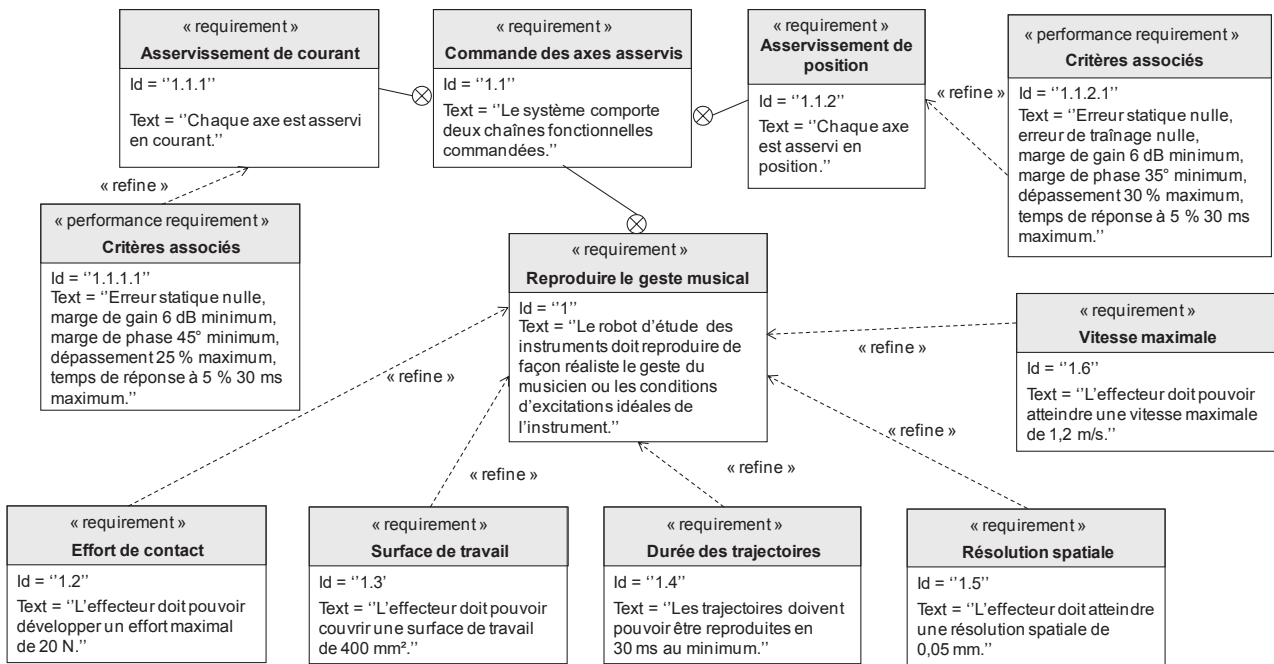


Figure 13 - Diagramme SysML partiel des exigences

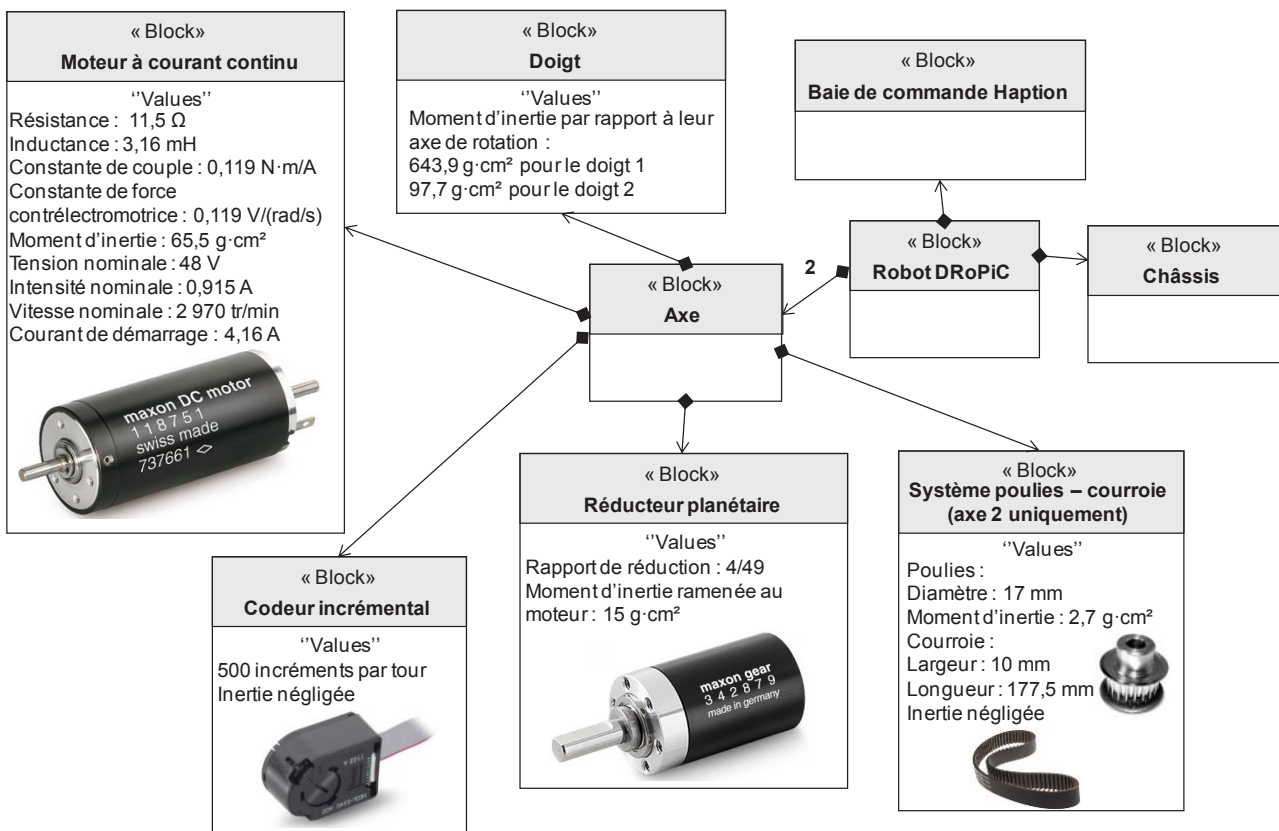
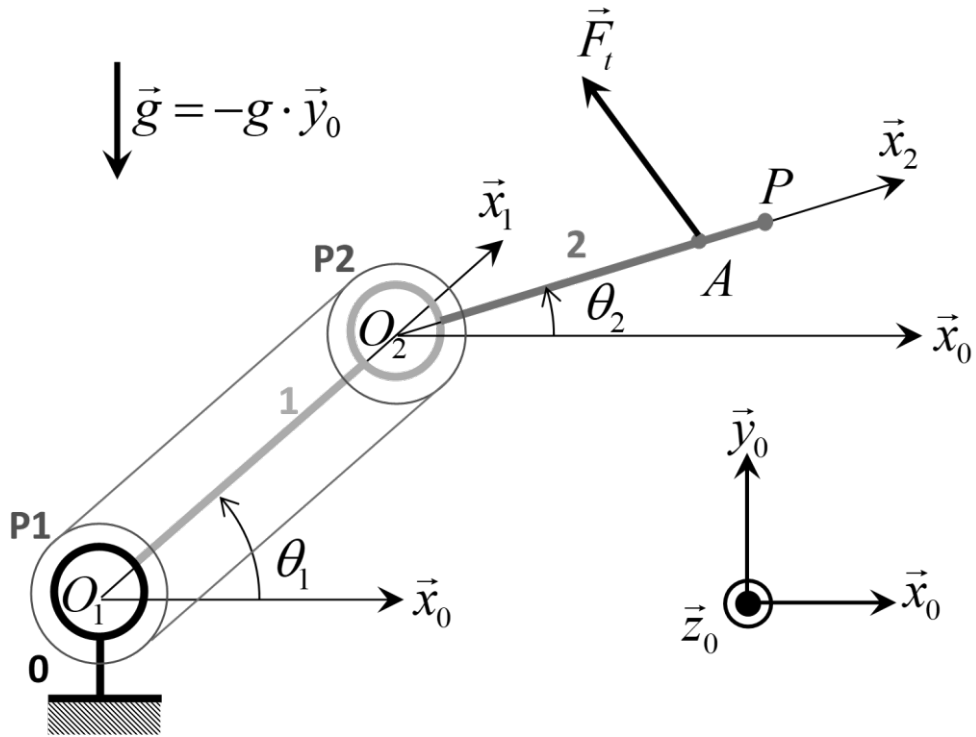
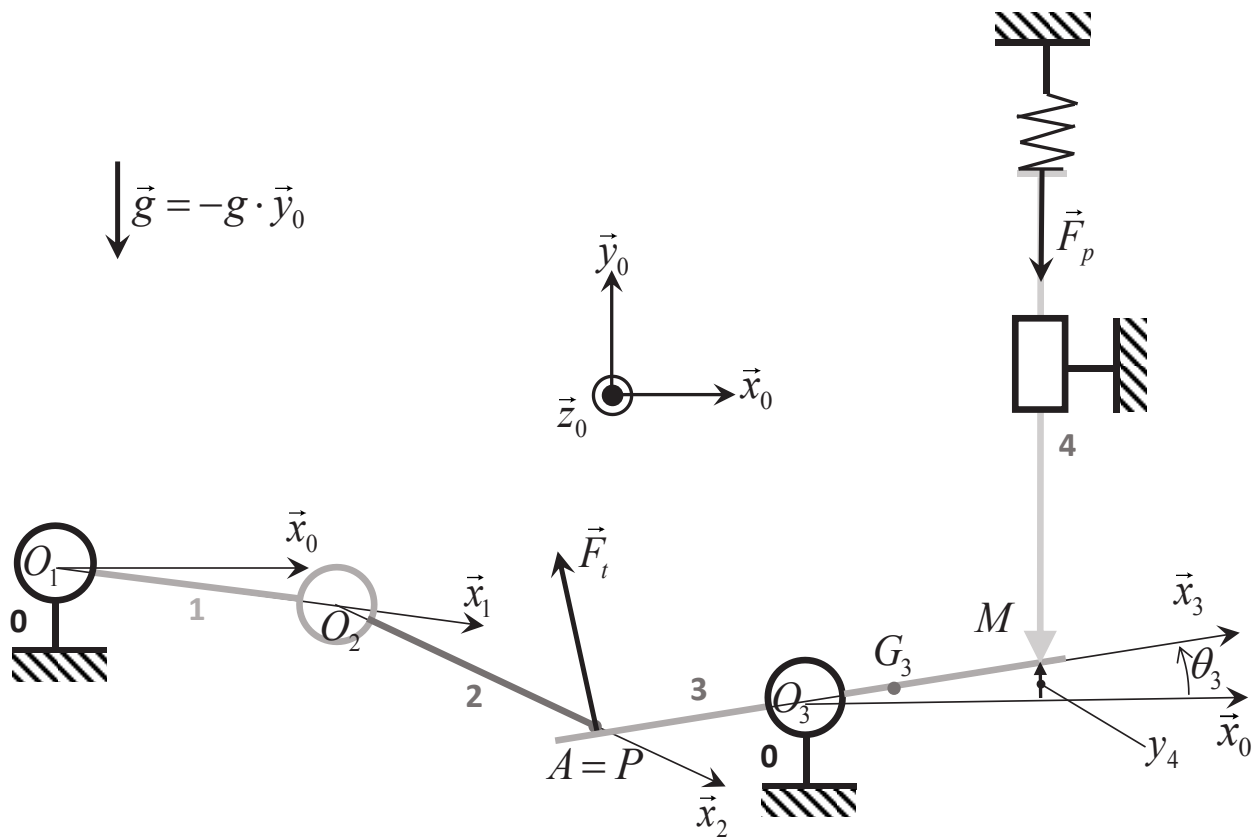


Figure 14 - Diagramme SysML de définition de blocs

**ANNEXE 2**  
**Modèles mécaniques**



**Figure 15** - Modèle géométrique du robot DroPiC



**Figure 16** - Modèle de l'ensemble robot + clavier



### ANNEXE 3

#### Tableau des données des modèles mécaniques

##### Paramétrage géométrique et cinétique

Solides	1	2	3	4
Paramétrage géométrique	$\overrightarrow{O_1O_2} = l_1\vec{x}_1$	$\overrightarrow{O_2P} = l_2\vec{x}_2$ $\overrightarrow{O_2A} = a_2\vec{x}_2$	$\overrightarrow{O_3P} = -l_3\vec{x}_3$ $\overrightarrow{O_3M}\cdot\vec{x}_0 = a_3$	-
	$l_1 = 45 \text{ mm}$	$l_2 = 45 \text{ mm}$	$l_3 = 120 \text{ mm}$ $a_3 = 210 \text{ mm}$	-
Centre de gravité	$\overrightarrow{O_1G_1} = c_1\vec{x}_1$	$\overrightarrow{O_2G_2} = c_2\vec{x}_2$	$\overrightarrow{O_3G_3} = c_3\vec{x}_3$	-
	$c_1 = \frac{l_1}{2}$	$c_2 = \frac{l_2}{2}$	$c_3 = 32,8 \text{ mm}$	-
Masses	$m_1 = 22,3 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$	$m_2 = 22,3 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$	$m_3 = 4,78 \cdot 10^{-2} \text{ kg}$	$m_4 = 4,93 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$
Moment d'inertie	$I_1$ selon l'axe $(G_1, \vec{z}_0)$	$I_2$ selon l'axe $(G_2, \vec{z}_0)$	$I_3$ selon l'axe $(G_3, \vec{z}_0)$	-
	$I_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$I_2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$I_3 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	-

Solides/0	Mouvements	Paramètres
1/0	Rotation d'axe $(O_1, \vec{z}_0)$	$\theta_1(t) = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1)$
2/0	Rotation d'axe $(O_2, \vec{z}_0)$	$\theta_2(t) = (\vec{x}_0, \vec{x}_2) = (\vec{y}_0, \vec{y}_2)$
3/0	Rotation d'axe $(O_3, \vec{z}_0)$	$\theta_3(t) = (\vec{x}_0, \vec{x}_3) = (\vec{y}_0, \vec{y}_3)$
4/0	Translation de direction $\vec{y}_0$	$y_4(t) = \overrightarrow{O_3M} \cdot \vec{y}_0$

##### Actions mécaniques

Actions	Torseurs
Couple en sortie de réducteur s'exerçant de 0 sur 1	$\{T_{MR0 \rightarrow 1}\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{0} \\ C_{r1}\vec{z}_0 \end{array} \right\}_{0_1}$
Couple en sortie de réducteur s'exerçant de 0 sur 2	$\{T_{MR0 \rightarrow 2}\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{0} \\ C_{r2}\vec{z}_0 \end{array} \right\}_{0_2}$
Effort de la touche 3 sur 2	$\{T_{3 \rightarrow 2}\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}_t = F_t\vec{y}_3 = F_x\vec{x}_0 + F_y\vec{y}_0 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_A$
Effort de la corde sur le sautereau 4	$\left\{ \begin{array}{c} \vec{F}_p = -F_p\vec{y}_0 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_M$ ; avec : $F_p(t) = K_{eq}y_4(t)$
	$K_{eq} = 400 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

## ANNEXE 4

### Tableau des données des schémas bloc

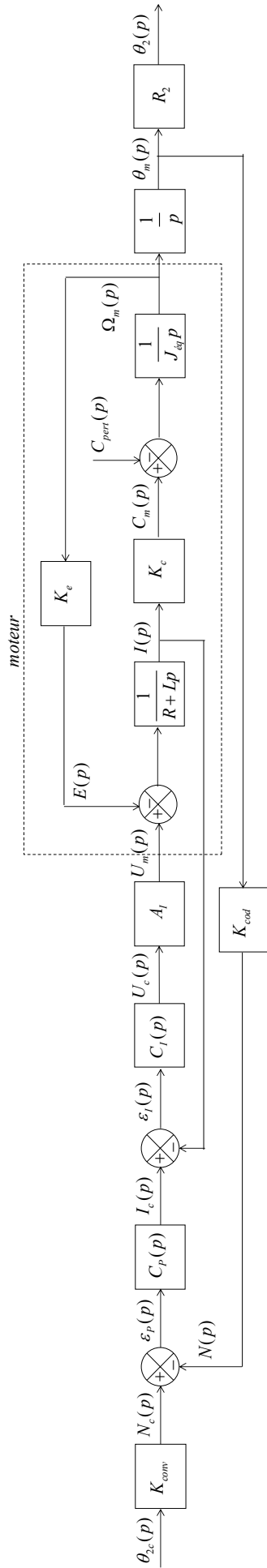
#### Blocs du schéma bloc d'asservissement en position

Éléments modélisés	Caractéristiques ou fonctions de transfert
Convertisseur de consigne de position	$K_{conv}$
Correcteurs de la boucle de position	$C_p(p) = K_{pp} + \frac{K_{ip}}{p} + K_{dp}p$ ou $C_p(p) = K_{pp} \frac{(1 + \tau_n p)^2}{1 + \tau_d p}$ avec $\tau_n < \tau_d$
Correcteur de la boucle de courant	$C_I(p) = K_{pl} + \frac{K_{il}}{p}$
Amplificateur	$A_I$
Codeur incrémental	$K_{cod}$
Transmetteur (réducteur planétaire et système poulies - courroie)	$R_2$
Moteur à courant continu	Résistance électrique de l'induit : $R$ Inductance électrique de l'induit : $L$ Constante de couple : $K_c$ Constante de tension contreélectromotrice : $K_e$ Inertie équivalente ramenée au moteur : $J_{\acute{e}q}$

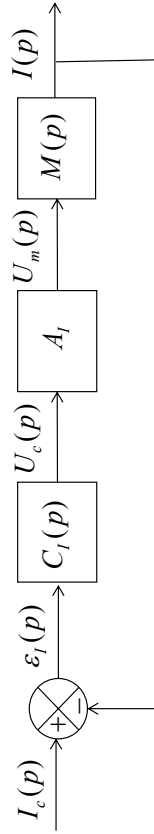
#### Grandeurs physiques du schéma bloc d'asservissement en position

Notations	Grandeurs physiques	Unités
$\theta_{2c}(p)$	Consigne angulaire de l'axe 2	rad
$\theta_2(p)$	Position angulaire de l'axe 2	rad
$N_c(p)$	Consigne angulaire convertie en grandeur numérique	incréments
$N(p)$	Mesure numérique de la position angulaire du moteur	incréments
$\varepsilon_p(p)$	Écart numérique de la boucle de position	incréments
$I_c(p)$	Consigne d'intensité du moteur	A
$\varepsilon_I(p)$	Écart de la boucle d'intensité	A
$U_c(p)$	Tension de commande	V
$U_m(p)$	Tension de l'induit du moteur	V
$E(p)$	Tension contreélectromotrice du moteur	V
$I(p)$	Intensité de l'induit du moteur	A
$C_m(p)$	Couple moteur	N · m
$C_{pert}(p)$	Couple de perturbation du moteur	N · m
$\Omega_m(p)$	Vitesse angulaire du moteur	rad/s
$\theta_m(p)$	Position angulaire du moteur	rad

## ANNEXE 5 Schémas bloc



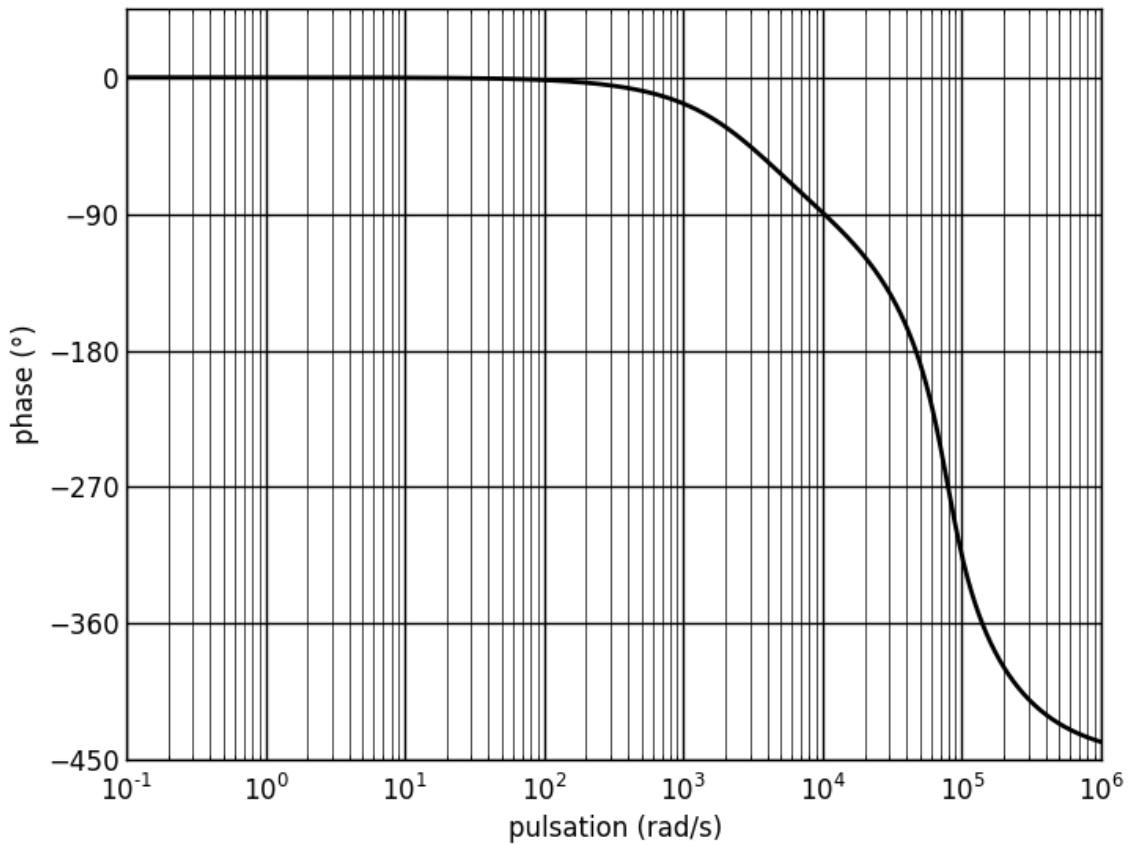
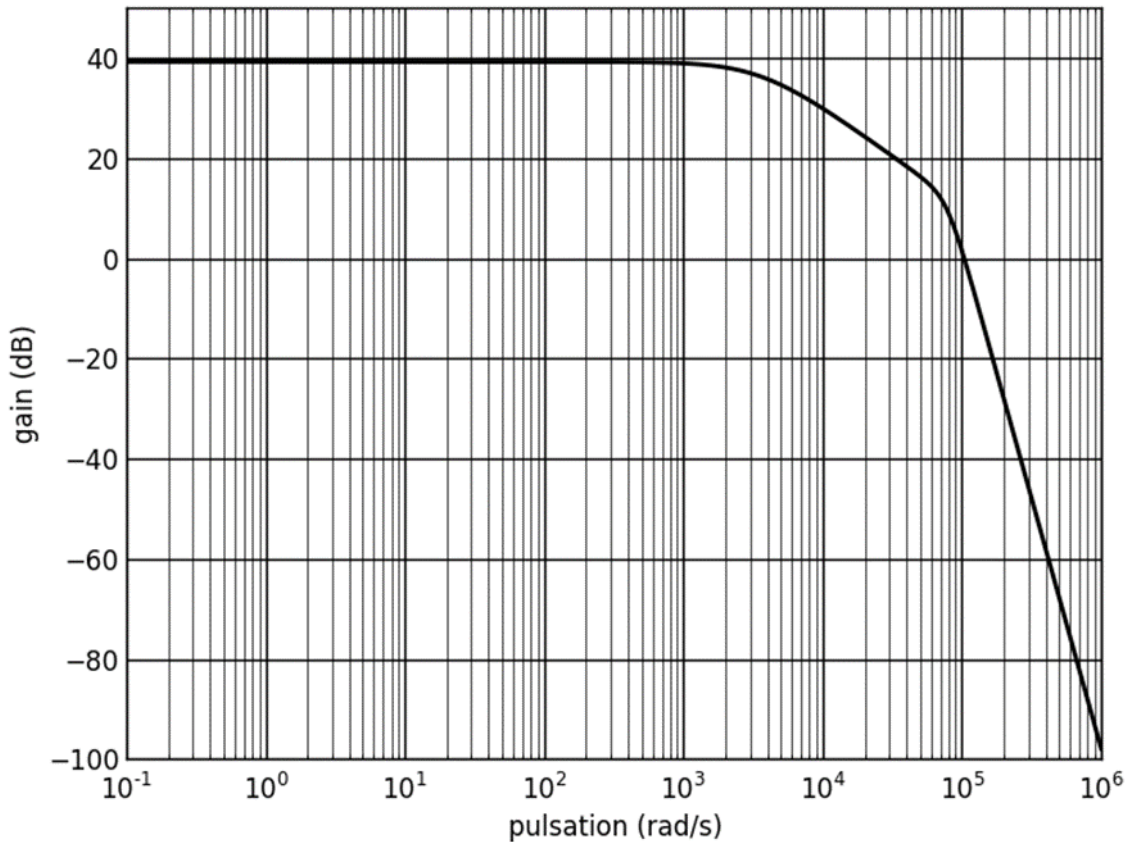
**Figure 17** – Schéma bloc de l'asservissement en position



**Figure 18** – Schéma bloc de l'asservissement en courant



Q28. et Q30.



NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

Q34.

