Concours e3a-Polytech, France

Session 2024, filière PSI

Sciences industrielles de l'ingénieur

Durée : 4 heures

Ce que traite le sujet

- Partie I : présentation du contexte de la micro-manipulation et de la pince
- Partie II : validation des exigences géométriques de la pince
- Partie III : validation des exigences mécaniques de la pince
- Partie IV : étude du contrôle asservi de la pince et du retour haptique
- Partie V : étude des fonctionnements alternatifs de la pince

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années : prepahelp.com/annales/e3a/psi/2024/si

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

ÉPREUVE MUTUALISÉE AVEC E3A-POLYTECH

ÉPREUVE SPÉCIFIQUE - FILIÈRE PSI

SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Durée : 4 heures

N.B. : le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

RAPPEL DES CONSIGNES

- *Utiliser uniquement un stylo noir ou bleu foncé non effaçable pour la rédaction de votre composition ; d'autres couleurs, excepté le vert, bleu clair ou turquoise, peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les schémas et la mise en évidence des résultats.*
- *Ne pas utiliser de correcteur.*
- *Écrire le mot FIN à la fin de votre composition.*

Les calculatrices sont interdites.

Le sujet comporte :
- Texte de l'Énoncé : 12 pages
- Annexes : 8 pages
- Document Réponse : 12 pages

Il est conseillé d'utiliser des feuilles de papier brouillon afin de mettre au point les développements mathématiques, schémas, graphes et courbes, avant de les recopier au propre sur le Document Réponse.

Seul le Document Réponse (DR) doit être rendu dans son intégralité.

PINCE BRUCELLES INSTRUMENTÉE HAPTIQUE DE MICRO-MANIPULATION

Inspiré de la thèse de doctorat en robotique de Sophia Sakr,
Robotique coopérative pour l'assistance à la manipulation multi-échelle
Sorbonne Université, Faculté des Sciences et Ingénierie, 2020

La **partie I** présente le contexte de la micro-manipulation et le système étudié.
La **partie II** porte sur la validation des exigences géométriques de la pince.
La **partie III** porte sur la validation des exigences mécaniques de la pince.
La **partie IV** porte sur l'étude du contrôle asservi de la pince et du retour haptique.
La **partie V** présente des fonctionnements alternatifs de la pince.

Partie I - Présentation du contexte de la micro-manipulation et de la pince

I.1 - Micro-manipulation manuelle et pince brucelles

La micro-manipulation désigne la manipulation d'objets de dimensions comprises entre quelques micromètres et quelques millimètres. Pour ceux assez grands pour être visibles à l'œil nu, mais trop petits pour être efficacement attrapés à la main, cela se fait actuellement bien souvent manuellement, avec des outils fins, tels que des pinces brucelles et requiert beaucoup d'expertise, de savoir-faire et de précision dans le geste. De nombreux domaines sont concernés par ces manipulations fines, complexes et rarement répétitives :

- la médecine (micro-chirurgie) ;
- l'artisanat (horlogerie, joaillerie) ;
- l'électronique (micro-circuits électroniques).

La pince brucelles est une pince fine à ressorts, ouverte au repos et adaptée pour saisir de très petits objets (**figure 1**). Les différents modèles manuels existants se distinguent par leur taille, rigidité ou encore embout de saisie.



Figure 1 - Pinces brucelles

I.2 - Pince brucelles instrumentée haptique

Dans des positions de travail souvent peu confortables et durant de longues heures, chirurgiens et artisans sont ainsi amenés à devoir contrôler leurs mains tant dans les mouvements minutieux que dans les efforts exercés pour le serrage de la pince.

Afin d'éviter des tremblements problématiques voire à plus long terme de nombreux troubles musculosquelettiques (TMS), une assistance cobotique (robotique collaborative) est naturellement envisagée à deux niveaux, tout en conservant la dextérité du geste manuel, l'adaptabilité à des tâches non répétitives et l'outil habituel pour l'opérateur :

- en co-manipulation : la pince robotisée assiste directement de façon collaborative le manipulateur dans ses mouvements et dans le maintien des efforts de serrage ;
- en téléopération : la pince esclave est pilotée à distance via la pince maître manipulée par l'opérateur dans un espace de travail plus ergonomique.

La téléopération permet d'amplifier ou de réduire les mouvements et les efforts et ainsi changer d'échelle au niveau de la pince esclave (manipulation d'objets plus petits ou plus grands). La dextérité du geste manuel peut également être améliorée en filtrant les éventuels mouvements physiologiques ou les tremblements parasites. Lorsque la commande est unidirectionnelle (du maître vers l'esclave, sans retour), le couplage est dit unilatéral. Au contraire, le couplage est dit bilatéral lorsqu'un retour d'information revient à l'opérateur, par exemple par le biais d'un retour haptique, qui permet alors à l'opérateur d'avoir la sensation de manipuler directement l'objet saisi par l'esclave. Une amplification des retours sensoriels permet également d'améliorer le geste manuel.



Figure 2 - Pince instrumentée

Le système étudié dans ce sujet se rapproche donc d'une pince brucelles classique. La pince instrumentée (**figure 2**) est polyvalente car destinée à quatre cas d'utilisation essentiels (diagramme SysML des cas d'utilisation **figure 9, annexe 1**) :

- manuelle : l'opérateur actionne alors uniquement avec ses doigts la fermeture de la pince sur un objet ;
- collaborative : l'opérateur commande avec sa main la pince, qui l'assiste alors notamment dans le contrôle de la force de serrage ou le maintien d'un objet (co-manipulation) ;
- maître : l'opérateur se sert de la pince pour contrôler à distance une autre pince (téléopération) ;
- esclave : le contrôle à distance permet automatiquement de suivre les mouvements du maître et de l'opérateur, en particulier l'ouverture et la fermeture de la pince (téléopération) sur un objet.

Dans les trois premiers cas d'utilisation, la pince est entre les mains de l'opérateur alors que dans le dernier cas, c'est un bras robotisé qui la déplace. Lorsque la pince est utilisée en téléopération en tant que pince maître, les déplacements sont suivis grâce à deux caméras infra-rouge et des marqueurs accrochés à la pince (système Optitrack, non étudié ici), et servent à commander le bras robotisé (non étudié ici).

Selon les cas d'utilisation, au plus trois actions mécaniques distinctes s'exercent sur les deux branches de la pince :

- F_u : force exercée par l'utilisateur sur la pince ;
- F_o : force exercée par l'objet saisi sur la pince ;
- C_m : couple exercé par le moteur sur la pince.

Q1. Compléter le tableau en cochant les cases lorsque l'action mécanique est non nulle pour chacun des quatre cas d'utilisation.

Le diagramme SysML partiel des exigences (**figure 10, annexe 1**) présente les principales exigences associées à la pince instrumentée.

Q2. Donner la sous-exigence du diagramme SysML partiel des exigences (**figure 10, annexe 1**) essentielle pour que la pince instrumentée puisse être employée dans le cas d'utilisation manuelle.

I.3 - Pince brucelles instrumentée

La **figure 3** donne une vue détaillée des éléments constitutifs de la pince instrumentée. Un diagramme SysML de définition des blocs est également fourni (**figure 11, annexe 1**) de même que la description incomplète des chaînes de puissance et d'information (**figure 12, annexe 2**).

Q3. Préciser les éléments numérotés de 1 à 8 des chaînes de puissance et d'information pour l'actionnement de la pince instrumentée haptique (**figure 12, annexe 2**).

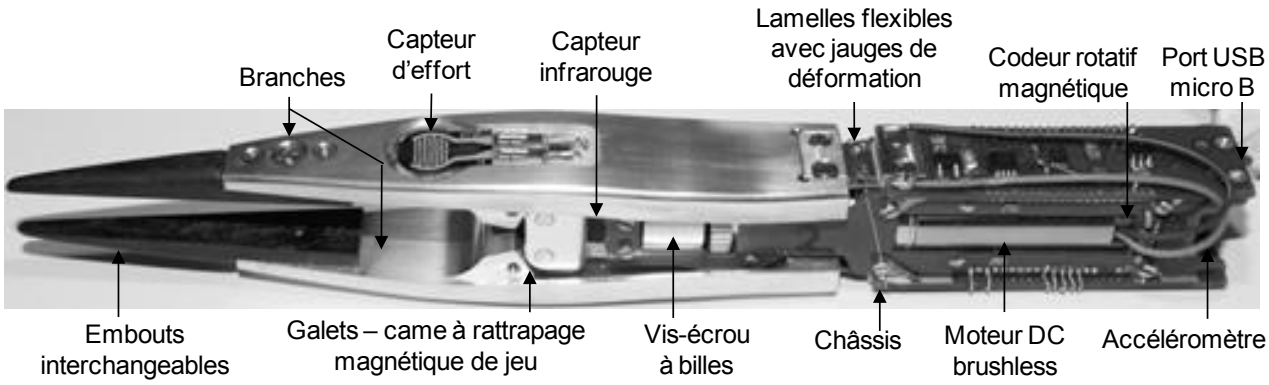


Figure 3 - Pince instrumentée – vue détaillée

Partie II - Validation des exigences géométriques de la pince

II.1 - Modèle géométrique de la pince

Le schéma cinématique d'une demi-pince est fourni (**figure 13, annexe 3**) ainsi que le paramétrage géométrique. Les liaisons entre les solides sont définies comme suit :

- 1/0 : liaison pivot d'axe $\left(A,\vec{z}_0\right)$;
- 4/1 : liaison cylindre-plan (ou linéaire rectiligne) de normale $\left(I,\vec{y}_2\right)$ et génératrice $\left(I,\vec{z}_0\right)$;
- 4/2 : liaison pivot d'axe $\left(C,\vec{z}_0\right)$;
- 2/3 : liaison hélicoïdale d'axe $\left(O,\vec{x}_0\right)$;
- 3/0 : liaison pivot d'axe $\left(O,\vec{x}_0\right)$.

Q4. Montrer par deux compositions des vitesses angulaires que $\vec{\Omega}\left(2/0\right)=\vec{0}$. En déduire la nature du mouvement de 2 par rapport à 0.

Q5. Déterminer le degré d'hyperstatisme du mécanisme constitué de la demi-pince (**figure 13, annexe 3**).

Q6. Déterminer le degré d'hyperstatisme du mécanisme complet (**figure 14, annexe 3**), sans considérer l'objet saisi. Comparer au résultat déterminé en **Q5** et justifier les éventuels écarts.

II.2 - Étude géométrique de la pince

On définit l'ouverture de la pince : $d = \overrightarrow{BB'} \cdot \vec{y}_0$ (**figure 14, annexe 3**).

La symétrie du mécanisme permet de calculer l'ouverture avec : $d = 2\overrightarrow{OB} \cdot \vec{y}_0$.

Q7. Déterminer l'expression de l'ouverture d en fonction de l'angle d'ouverture α et des données constantes.

La courbe de l'ouverture d en fonction de l'angle d'ouverture α est donnée **figure 4**.

Q8. Justifier d'après le résultat obtenu en **Q7** l'allure de la courbe obtenue **figure 4** et donner les valeurs numériques de a en $\mathrm{m \cdot rad^{-1}}$ et b en m, tels que : $d = a\alpha + b$.

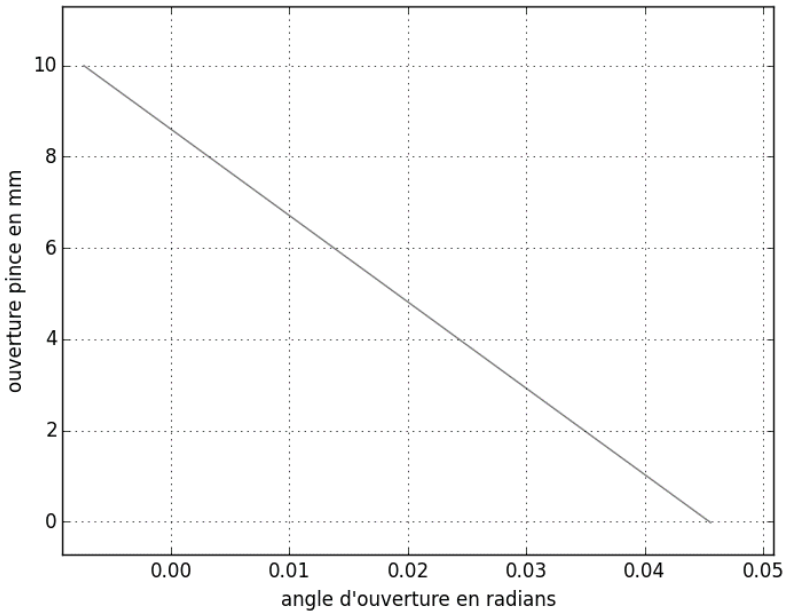


Figure 4 - Ouverture de la pince en fonction de l'angle d'ouverture α

Q9. Montrer par une fermeture géométrique que la relation entre le déplacement de l'écrou x_D et l'angle d'ouverture α peut s'écrire comme suit :

$$x_D = \frac{d_1 \sin\beta + d_2 \cos(\alpha + \beta) + d_3}{\sin(\alpha + \beta)} - d_4.$$

Préciser les expressions de d_1, d_2, d_3 et de d_4 en fonction des données constantes.

La courbe obtenue est donnée sur la **figure 5**.

Q10. Déterminer d'après la courbe de la **figure 5** le gain K_D en $\mathrm{m \cdot rad^{-1}}$ tel que $x_D = K_D \alpha$.

Le codeur rotatif magnétique placé sur l'axe moteur mesure l'angle moteur θ_3 en absolu et code sa valeur en un nombre entier selon ses caractéristiques précisées sur le diagramme SysML de définition des blocs (**figure 11, annexe 1**).

Q11. Déduire des questions précédentes la relation entre l'ouverture d et l'angle moteur θ_3 (voir **annexe 3**). Exprimer la plus petite variation $\Delta\theta_3$ mesurable par le codeur. En déduire la plus petite variation Δd d'ouverture correspondante. Seules les expressions littérales sont attendues.

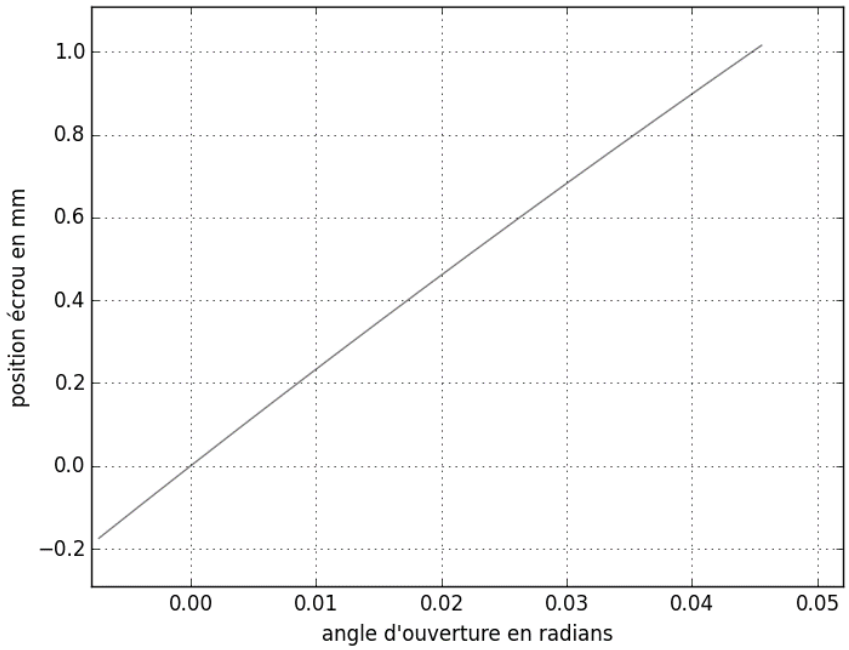


Figure 5 - Position de l'écrou en fonction de l'angle α de la branche

Partie III - Validation des exigences mécaniques de la pince

III.1 - Étude dynamique de la pince

On utilisera pour cette sous-partie la relation trouvée à la **Q10** : $x_D = K_D\,\alpha$.
Les données et notations utiles sont en **annexes 3** et **4**.

Q12. En exprimant la condition de roulement sans glissement au point *I* et en utilisant le résultat de **Q4**, déterminer la vitesse de rotation $\omega_{4/0}$ d'un galet en fonction de la vitesse d'ouverture $\dot{\alpha}$. En déduire le gain K_G, tel que : $\omega_{4/0} = K_G\,\dot{\alpha}$ en considérant l'angle α petit.

Pour établir l'équation de dynamique de la pince, on suppose que celle-ci est en mouvement et soumise aux actions mécaniques données en **annexe 4** et l'objet déformable ne bloque pas le mouvement. **Les actions de la pesanteur seront négligées. L'hypothèse des petits angles** sera à nouveau retenue pour l'angle α .

On supposera pour la suite $\alpha' = -\alpha$.

Q13. Exprimer l'énergie cinétique $E_c(\Sigma/0)$ de l'ensemble $\Sigma = \{1,1',2,3,4,4'\}$.

Q14. En déduire l'expression de l'inertie équivalente J_{eq} rapportée sur l'axe moteur, telle que :

$$E_c(\Sigma/0) = \frac{1}{2} J_{eq}\,\dot{\theta}_3^{\,2} \ .$$

Q15. Exprimer la puissance galiléenne des actions extérieures à l'ensemble Σ.

Q16. Exprimer la puissance des actions intérieures à l'ensemble Σ.

Q17. Déduire des questions précédentes C_{eq}, f_{eq}, l_u et l_o, tels que :

$$J_{eq}\,\ddot{\theta}_3 + f_{eq}\,\dot{\theta}_3 + C_{eq}\,\theta_3 = -l_u\,F_u + l_o\,F_o + C_m\,.$$

III.2 - Retour haptique

Quand la pince est utilisée en pince maître de téléopération, afin de permettre à l'opérateur d'avoir la sensation de manipuler directement l'objet saisi par la pince esclave, le moteur doit simuler l'action de l'objet saisi en bloquant la pince maître. Pour que cela soit possible, on souhaite étudier la capacité **statique** du moteur à simuler le contact avec un objet saisi (pince maître) ou à saisir un objet (pince esclave).

Q18. Simplifier l'équation obtenue à la **Q17** dans le cas de la pince maître et exprimer le couple moteur nécessaire dans cette situation.

Q19. Simplifier l'équation obtenue à la **Q17** dans le cas de la pince esclave et exprimer le couple moteur nécessaire dans cette situation.

On donne **figure 6** l'évolution du couple moteur théorique en fonction de l'effort de l'utilisateur (obtenu en **Q18**) ou de l'objet (obtenu en **Q19**).

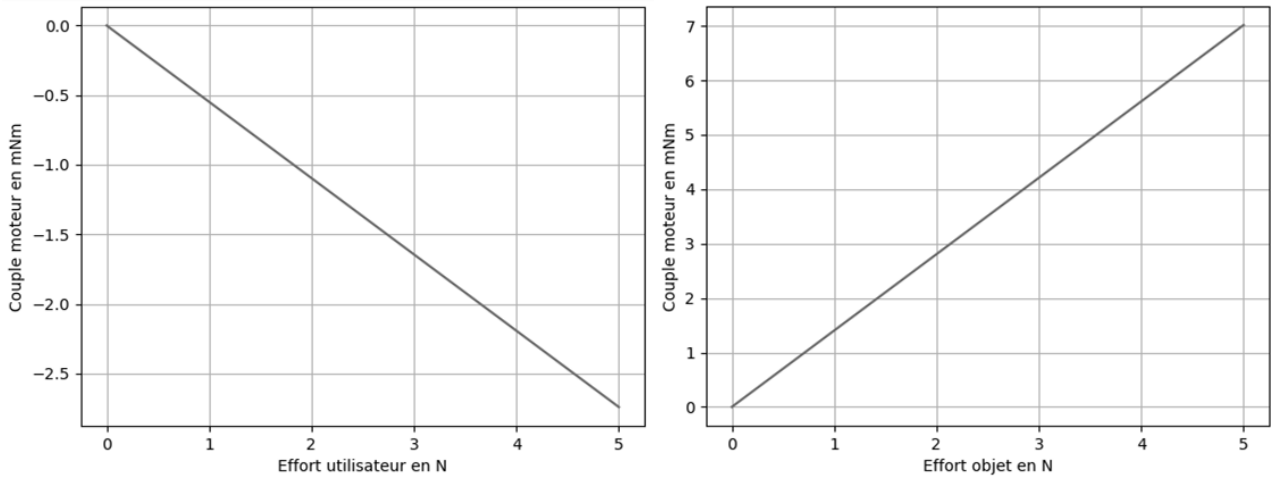


Figure 6 - Couple moteur en fonction de l'effort de l'utilisateur (gauche) ou de l'objet (droite)

Q20. Conclure quant à la capacité du moteur à vérifier les exigences 1.4.1 et 2.1.1.1 dans ces deux cas d'utilisation.

III.3 - Modification de la raideur de la pince

Le couple C_{eq} de la **Q17** est lié aux lamelles flexibles qui donnent à la pince une raideur naturelle C_r. Dans les cas d'utilisation de co-manipulation, afin d'adapter la pince à l'utilisateur, on peut grâce au moteur augmenter ou diminuer la raideur apparente C_a, c'est-à-dire la raideur ressentie par l'utilisateur, telle que :

$$J_{eq}\,\ddot{\theta}_3 + f_{éq}\,\dot{\theta}_3 + 2C_a\left(\frac{pas}{2\pi K_D}\right)^2\theta_3 = -l_u\,F_u + l_o\,F_o\,.$$

Q21. Exprimer le couple moteur C_m en fonction du couple C_{eq} et de la raideur apparente C_a, puis en fonction des raideurs naturelle C_r et apparente C_a.

Q22. En déduire l'intensité moteur i en fonction des raideurs naturelle C_r et apparente C_a. Donner la valeur de cette intensité si l'utilisateur souhaite utiliser la pince avec sa raideur naturelle, c'est-à-dire pour $C_a = C_r$.

Partie IV - Étude du contrôle asservi de la pince et du retour haptique

IV.1 - Modélisation de l'asservissement de la pince

La pince est asservie à la fois en courant et en position comme le montre le schéma bloc (**figure 15**, **annexe 5**). Les données du schéma bloc sont détaillées dans **l'annexe 6.**

Q23. Déterminer la fonction de transfert $H_4(p)$. Puis, en utilisant l'équation dynamique de la **Q17**, déterminer les fonctions de transfert $H_1(p)$, $H_2(p)$ et $H_3(p)$.

Q24. Exprimer l'écart $\varepsilon_P(p)$ en sortie du comparateur de la boucle de position en fonction de la consigne d'ouverture $d_c(p)$ et de l'ouverture $d(p)$ de la pince. En déduire l'expression du gain K_{conv} pour que l'asservissement de position soit correct.

IV.2 - Correction et performances de la boucle de courant

On considère tout d'abord que la pince ne subit ni l'action de l'utilisateur $F_u(p) = 0$, ni l'action de l'objet à saisir $F_o(p) = 0$.

On s'intéresse à la boucle d'asservissement de courant pour en analyser les performances et régler le correcteur associé afin d'atteindre les performances exigées.

Q25. Exprimer la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée de l'asservissement de courant et montrer qu'elle peut s'écrire sous la forme suivante. Préciser les expressions des constantes a_1, a_2, a_3, a_4 et a_5.

$$H_{BOI}(p) = \frac{I(p)}{U_m(p)} = \frac{1}{R}\frac{1 + a_1 p + a_2 p^2}{1 + a_3 p + a_4 p^2 + a_5 p^3}.$$

On considère dans un premier temps un correcteur proportionnel $C_I(p) = K_{pI}$.

Q26. Déterminer l'expression puis la valeur numérique du gain K_{pI} permettant de respecter l'exigence de précision de la boucle de courant.

Le **DR** 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.

On envisage d'utiliser dans un second temps un correcteur proportionnel intégral $C_I(p) = K_{pI}\dfrac{1+T_I p}{T_I p}$.

Q27. Sur les mêmes diagrammes, superposer les diagrammes asymptotiques de Bode de ce correcteur ainsi que l'allure des diagrammes réels pour une constante de temps $T_I = 0{,}1\ \text{s}$ et un gain $K_{pI} = 1\ \text{V·A}^{-1}$.

Q28. Vérifier si les exigences de stabilité et de précision de la boucle de courant sont respectées avec ce correcteur. Expliquer en justifiant si ce résultat dépend des valeurs du gain K_{pI}.

On considérera pour la suite que le gain K_{pI} et la constante de temps T_I sont choisis pour respecter l'exigence de rapidité de la boucle de courant.

IV.3 - Modification de la raideur de la pince

On considère dans cette sous-partie que la pince subit l'action de l'utilisateur $F_u(p) \neq 0$, mais pas d'action de l'objet à saisir $F_o(p) = 0$. La raideur souhaitée C_a de la pince peut être augmentée ou diminuée grâce au moteur par rapport à sa raideur naturelle C_r (**sous-partie III.3**). La pince est alors uniquement asservie en courant (mais pas en position), avec une consigne d'intensité $I_c(p)$ que l'on peut générer à partir de la mesure de position $N(p)$ donnée par le système de jauges de déformation, telle que :

$$I_c(p) = (C_r - C_a) C_{NI} N(p) \text{ où } C_{NI} \text{ est une constante.}$$

La **figure 7** représente les réponses temporelles d'ouverture d et d'intensité I du moteur de la pince suite à une action de l'utilisateur F_u de type rampe de pente $2\ \text{N/s}$ pour des raideurs souhaitées C_a de $1{,}1\ \text{Nm/rad}$ (courbes en tirets), $2{,}2\ \text{Nm/rad}$ (courbes en trait continu) et $4{,}4\ \text{Nm/rad}$ (courbes en pointillés).

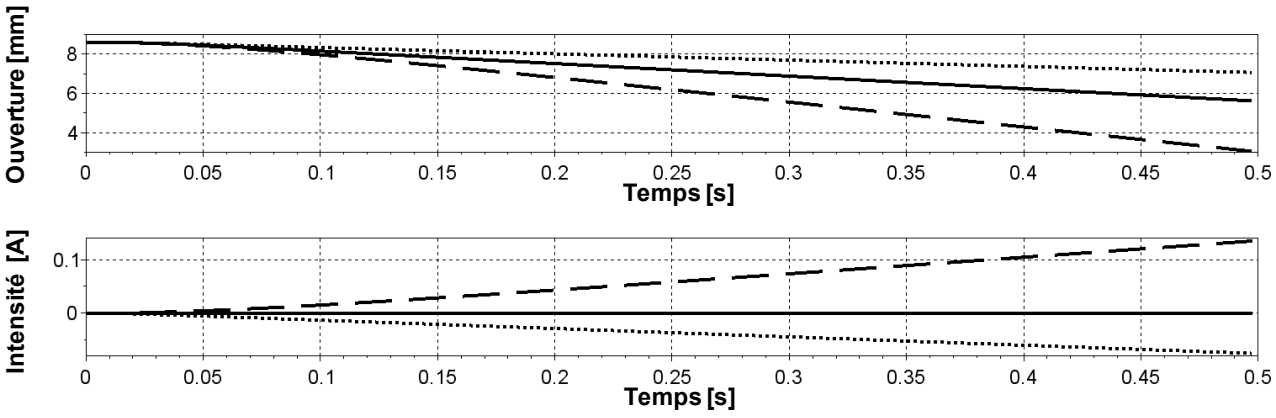


Figure 7 - Réponses temporelles d'ouverture et d'intensité suite à une action de l'utilisateur de type rampe de pente $2\ \text{N/s}$ pour des raideurs souhaitées C_a

Q 29. Identifier dans quel cas le moteur assiste l'utilisateur et dans quel cas il s'oppose à l'action de l'utilisateur.

Q 30. Déduire des courbes obtenues la valeur de la raideur naturelle C_r de la pince.

IV.4 - Correction et performances de la boucle de position

On considère à nouveau que la pince ne subit ni action de l'utilisateur $F_u(p)=0$ ni action de l'objet à saisir $F_o(p)=0$. La boucle d'asservissement de courant étant réglée, on s'intéresse ensuite à la boucle d'asservissement de position pour à nouveau en analyser les performances et régler le correcteur associé afin d'atteindre les performances exigées.
On considère dans un premier temps un correcteur proportionnel $C_P(p)=-1$.

Q31. Justifier ce choix de signe pour $C_P(p)$ en vous appuyant sur le gain K_{jauges} du système de jauges de déformation dont la valeur est donnée sur le diagramme SysML de définition des blocs (**figure 11, annexe 1**), sachant que $k_5>0$. Expliquer en justifiant si l'exigence de précision de la boucle de position est respectée avec ce correcteur.

Le **DR** donne les diagrammes de Bode en gain et en phase de la fonction de transfert en boucle ouverte de l'asservissement de position avec ce correcteur :

$$H_{BOP}(p)=\frac{N(p)}{\varepsilon_P(p)}.$$

Q32. Expliquer en justifiant si l'exigence de stabilité de la boucle de position est respectée avec ce correcteur.

On considère dans un deuxième temps un correcteur à avance de phase :

$$C_P(p)=K_{pP}\frac{1+aT_a p}{1+T_a p} \text{ avec } a>1.$$

On rappelle que ce correcteur apporte une phase maximale $\varphi_{\max}=\arcsin\frac{a-1}{a+1}$ pour la pulsation $\omega_{\max}=\frac{1}{\sqrt{a}T_a}$.

Q33. Afin de respecter les valeurs limites des exigences de rapidité et de stabilité (marge de phase) de la boucle de position à cette pulsation $\omega_{\max}$, justifier la méthode pour obtenir les valeurs numériques retenues de $a\approx 6$, $T_a\approx 4\cdot10^{-4}\text{s}$ et $K_{pP}\approx -3\cdot10^{-2}\text{A/inc}$.

Q34. Sur les mêmes diagrammes que ceux de la **Q32**, superposer les diagrammes asymptotiques de Bode de ce correcteur ainsi que l'allure des diagrammes réels en indiquant les valeurs remarquables en fonction de a, T_a et de K_{pP}.

Afin de respecter l'exigence de précision de la boucle de position, on considère enfin dans un troisième temps l'ajout d'un correcteur proportionnel intégral au correcteur précédent :

$$C_P(p)=K_{pP}\frac{1+aT_a p}{1+T_a p}\frac{1+T_P p}{T_P p} \text{ avec } a>1.$$

Q35. Expliquer comment choisir la constante de temps T_P afin de ne pas affecter le réglage précédent.

IV.5 - Retour haptique

Quand la pince est utilisée en pince maître en téléopération, l'utilisateur applique sur celle-ci une action $F_u(p) \neq 0$, mais c'est la pince esclave qui saisit l'objet donc l'action de l'objet à saisir est sur la pince maître $F_o(p) = 0$. Afin de permettre à l'opérateur d'avoir la sensation de manipuler directement l'objet saisi par l'esclave, l'asservissement de la pince est utilisé pour réaliser un retour haptique. On considère que l'objet à saisir est de dimension connue d_o :

- tant que l'ouverture d est supérieure à d_o, la pince maître peut être manipulée librement (consigne de la boucle de courant nulle) ;
- dès que d est inférieure ou égale à d_o, la pince est asservie à la consigne de position d_o.

Cette commande haptique peut-être modélisée en réglant la consigne de position de l'asservissement à la dimension de l'objet, soit $d_c = d_o$, et en remplaçant le comparateur du schéma bloc précédent par un bloc non linéaire à deux entrées générant numériquement l'écart non linéaire $\varepsilon_P(p)$ à partir des grandeurs numériques $N_c(p)$ et $N(p)$:

$$\varepsilon_P = \begin{cases} 0 \; si \; N(p) > N_c \\ N_c - N(p) \; si \; N(p) \leq N_c \end{cases}, \text{ avec } N_c = K_{conv}(d_0 - b) \text{ et } K_{conv} > 0.$$

La **figure 8** représente les réponses temporelles d'ouverture d, de tension U_m et d'intensité I du moteur de la pince maître pour un objet simulé de taille $\mathrm{d_o} = 4\ \mathrm{mm}$ suite à une action de l'utilisateur de type échelon $F_u = 3\ \mathrm{N}$ à partir de $t = 0{,}1\ \mathrm{s}$.

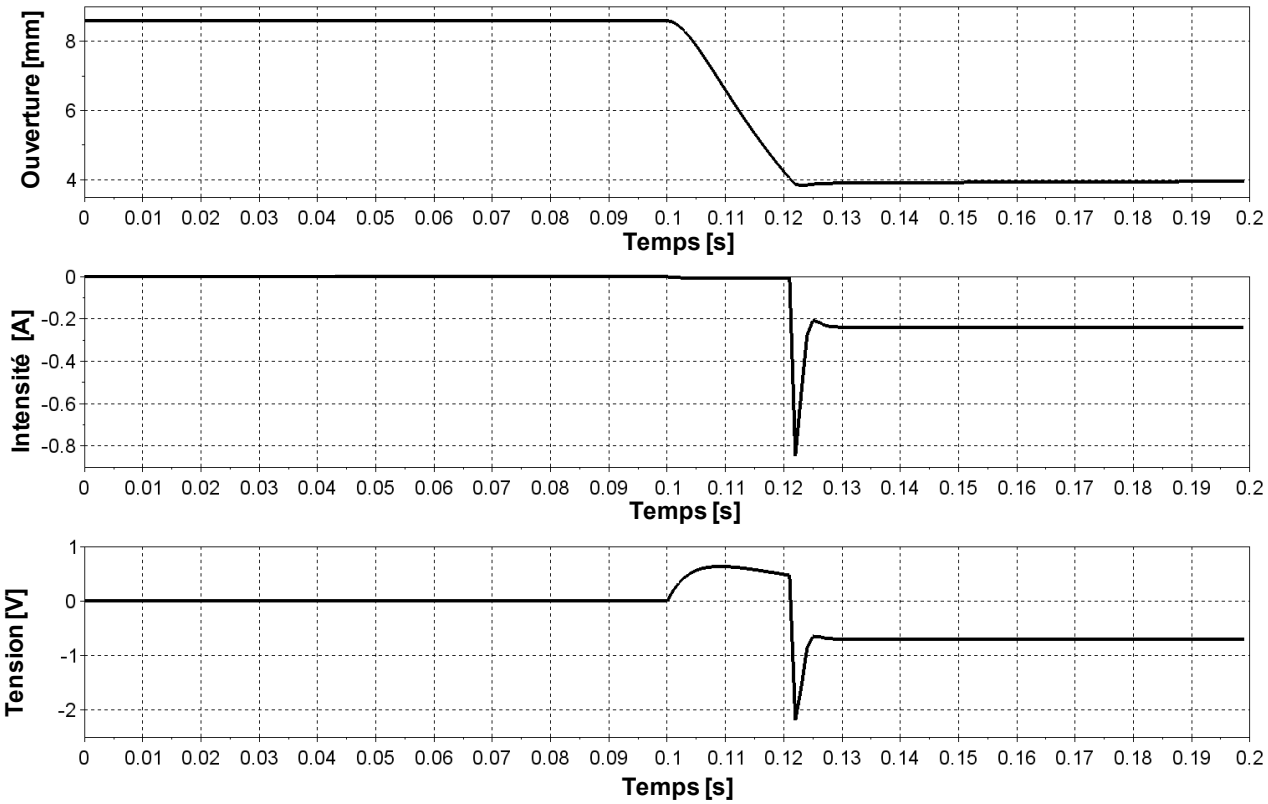


Figure 8 - Réponses temporelles d'ouverture, d'intensité et de tension pour un objet simulé de taille 4 mm suite à une action de l'utilisateur de 3 N à 0,1 s

Q36. Commenter les courbes obtenues. Justifier en particulier les performances du retour haptique en vous appuyant sur les correcteurs choisis dans les parties précédentes. Comparer les valeurs de la tension et de l'intensité aux valeurs du diagramme SysML de définition des blocs (**figure 11, annexe 1**).

Partie V - Étude des fonctionnements alternatifs de la pince

On s'intéresse dans cette partie au cas d'utilisation '' saisir en co-manipulation ''. Ce cas d'utilisation est associé au fonctionnement en pince brucelles inversée (exigence id = ''1.6.3''). Les pinces brucelles inversées sont des pinces normalement fermées. L'utilisateur doit exercer un effort pour ouvrir les branches. La raideur naturelle de la pince inversée permet le maintien de l'objet sans action de l'utilisateur. La conception mécanique de la pince instrumentée ne permet pas un fonctionnement rigoureusement identique mais il est possible de simuler ce fonctionnement.

V.1 - Blocage de la fermeture

Une première version simplifiée de ce mode de fonctionnement consiste à permettre à l'utilisateur de bloquer la fermeture et donc de maintenir l'objet sans effort par un simple appui sur une pédale munie d'un contacteur TOR. Lorsque la pince est bloquée, un nouvel appui sur la pédale permet de la débloquer. La variable logique associée au contacteur est notée con, telle que $con = 1$ quand l'utilisateur appuie sur la pédale et $con = 0$ sinon. Ce fonctionnement est décrit par le diagramme d'état **figure 16, annexe 7.**

Q37. Donner les expressions de r_1 et de r_2 associées au franchissement des transitions permettant de respecter le fonctionnement décrit.

V.2 - Commande en mode pince brucelles inversée

Afin de simuler plus précisément une pince brucelles inversée, on souhaite implanter un algorithme qui prend en compte l'ouverture de la pince (angle α) et l'effort de l'utilisateur F_u. Lorsque la mesure de l'effort de l'utilisateur dépasse le seuil $F_{u,\max}$, alors que la mesure de l'angle α est supérieure au seuil $\alpha_{\max}$, la pince est actionnée en fermeture. Si l'utilisateur exerce à nouveau un effort supérieur au seuil, la pince est actionnée en ouverture, jusqu'à ce que l'angle α repasse en-deçà du seuil $\alpha_{\max}$. Ce fonctionnement est décrit par le diagramme d'état **figure 17, annexe 7.** On suppose que l'utilisateur manipule la pince avant d'avoir besoin de la refermer automatiquement, l'état d'attente correspond à une position de la pince ouverte.

Q38. Donner les expressions de r_3, r_4 et de r_5 associées au franchissement des transitions permettant de respecter le fonctionnement décrit.

ANNEXE 1 - Diagrammes SysML et chaînes fonctionnelles

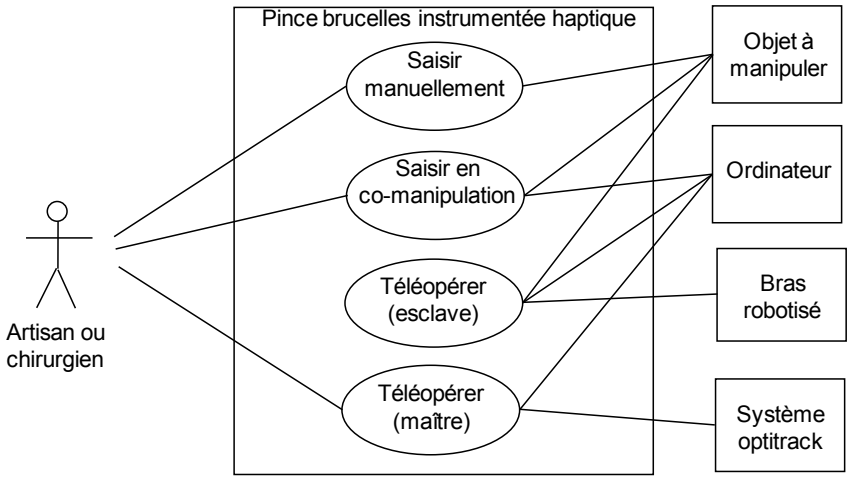


Figure 9 - Diagramme SysML des cas d'utilisation

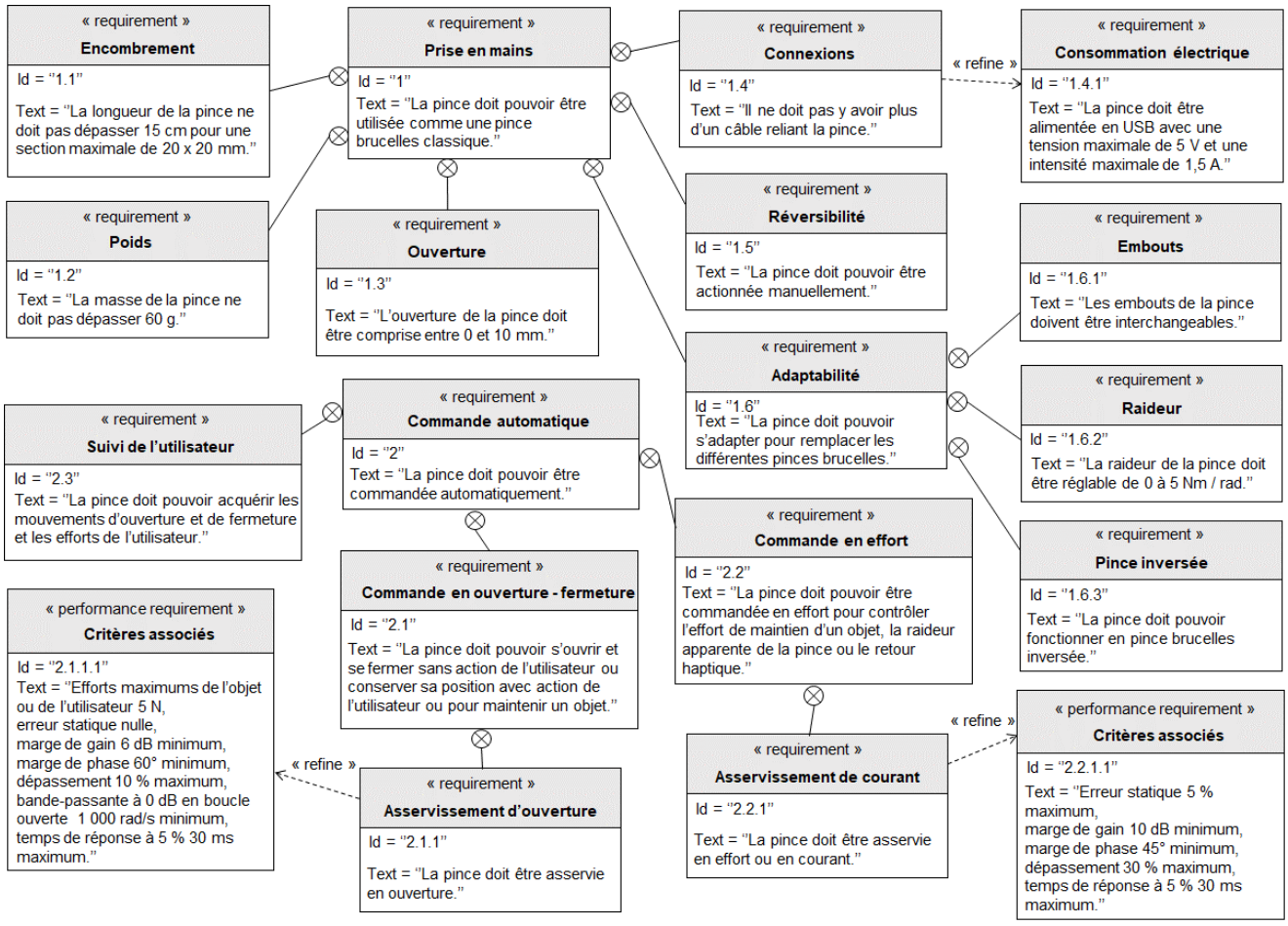


Figure 10 - Diagramme SysML partiel des exigences

Figure 11 - Diagramme SysML de définition de blocs

ANNEXE 2 - Chaînes fonctionnelles

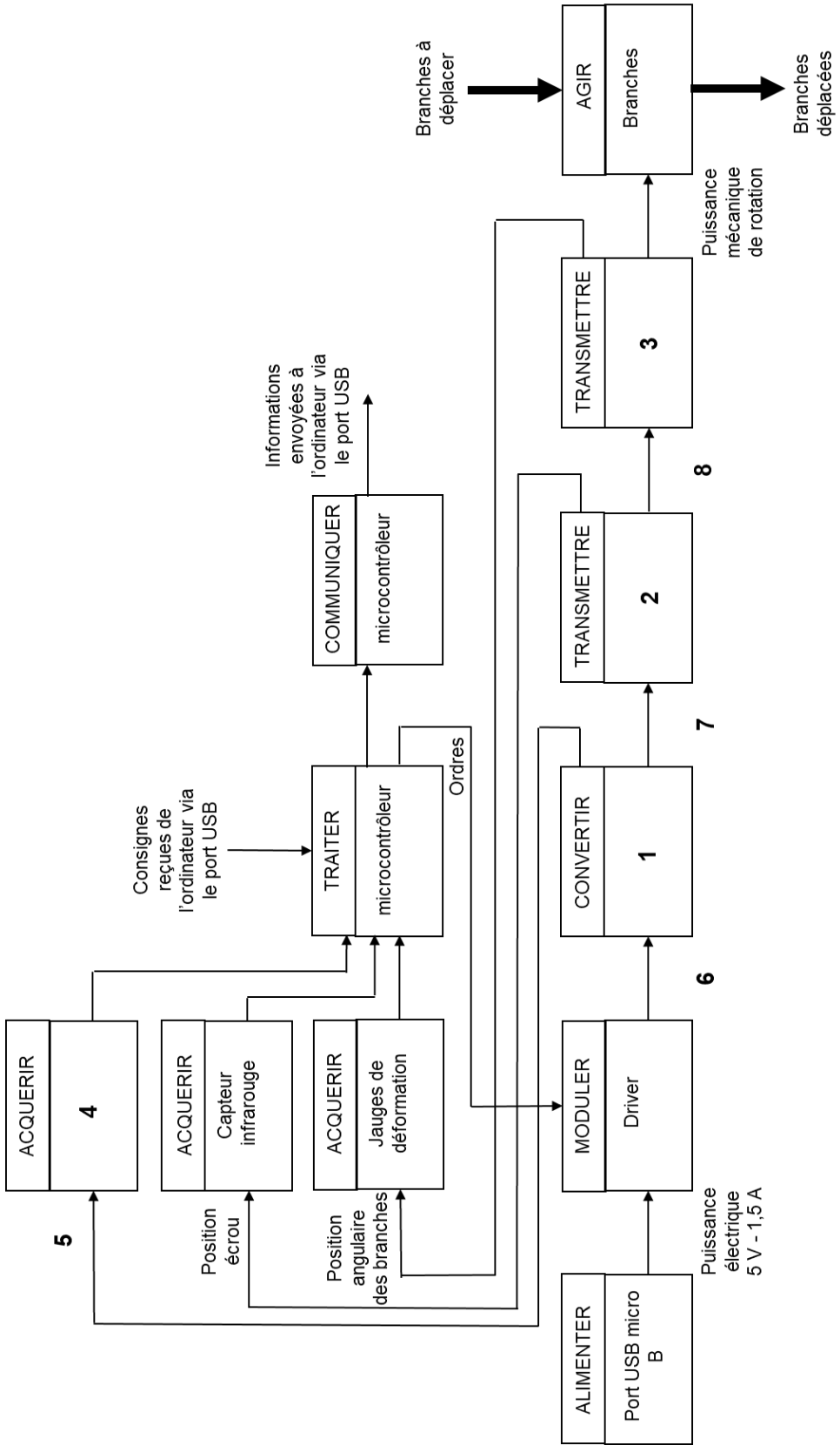


Figure 12 - Chaînes de puissance et d'information d'actionnement de la pince

ANNEXE 3 - Modèles mécaniques

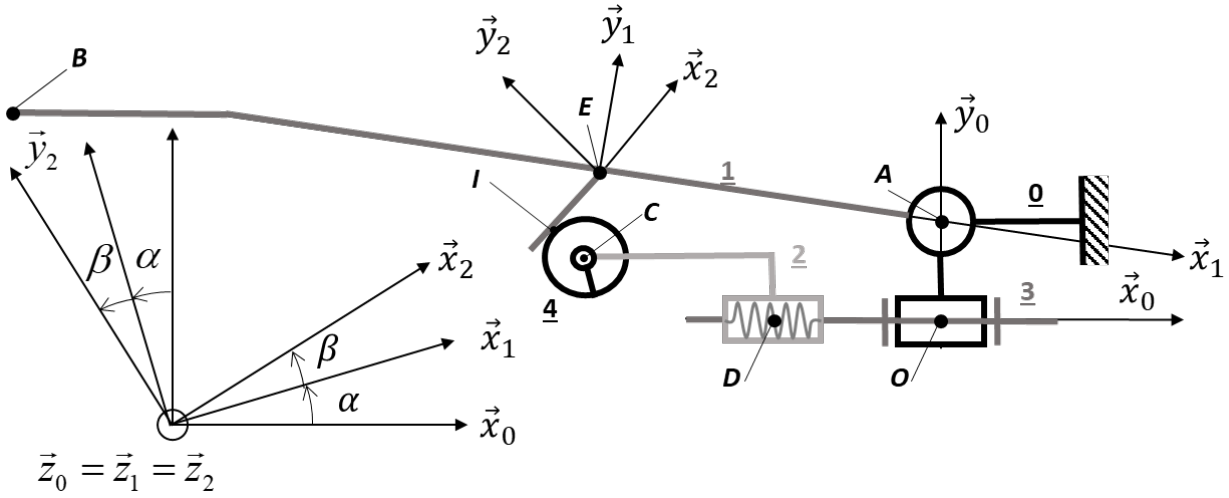


Figure 13 - Modèle géométrique de la demi-pince

Paramètres variables

$\alpha = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1)$

$\overrightarrow{OD} = x_D \vec{x}_0$

$\overrightarrow{EI} = x_I \vec{x}_2$ avec $x_I < 0$

et α, x_D et x_I variables

Données constantes

$\beta = (\vec{x}_1, \vec{x}_2) = (\vec{y}_1, \vec{y}_2) = 60°$

$\overrightarrow{OA} = y_A \vec{y}_0$

$\overrightarrow{AE} = x_E \vec{x}_1$ avec $x_E < 0$

$\overrightarrow{CI} = R_g \vec{y}_2$

$\overrightarrow{DC} = x_C \vec{x}_0 + y_C \vec{y}_0$ avec $x_C < 0$

$\overrightarrow{AB} = x_B \vec{x}_1 + y_B \vec{y}_1$

avec $x_B < 0$ et $y_B < 0$

Angle moteur θ_3 en fonction de la position de l'écrou x_D

$x_D = \dfrac{pas}{2\pi} \theta_3$ avec $\theta_3 = 0°$ si $\alpha = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1) = 0°$

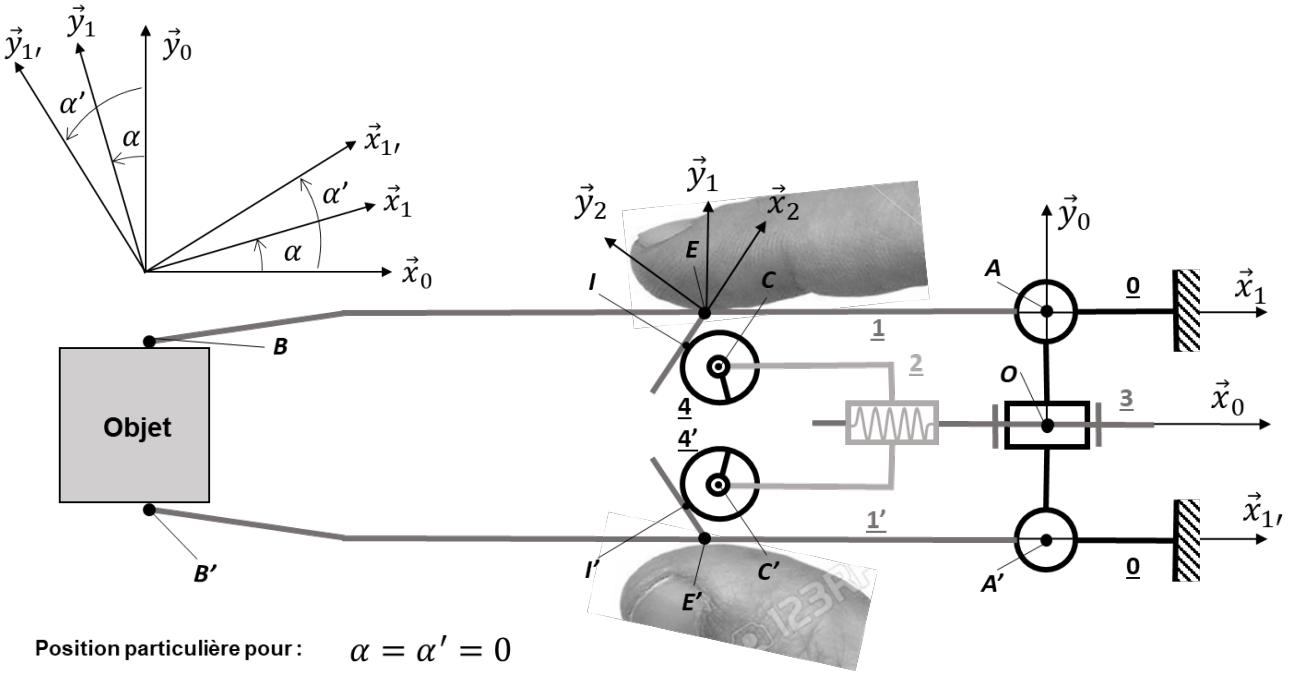


Figure 14 - Modèle géométrique de la pince complète

ANNEXE 4 - Tableau des données des modèles mécaniques

Paramétrage cinétique

Solides	1 ou 1’	2	3	4 ou 4’
Masse	m_1	m_2	m_3	m_4
Moment d’inertie	I_1 selon les axes $(A,\vec{z}_0)$ ou $(A',\vec{z}_0)$	I_2 selon l’axe $(O,\vec{x}_0)$	I_3 selon l’axe $(O,\vec{x}_0)$	I_4 selon les axes $(C,\vec{z}_0)$ ou $(C',\vec{z}_0)$

Paramétrage cinématique

Solides/0	Mouvements	Paramètres
1 ou 1’/0	Rotation d’axe $(A,\vec{z}_0)$ ou $(A',\vec{z}_0)$	$\alpha(t)$ ou $\alpha'(t)$
2/0	Translation de direction $\vec{x}_0$	$x_D(t)$
3/0	Rotation d’axe $(O_3,\vec{z}_0)$	$\theta_3(t)$
4 ou 4’/0	Translation de direction $\vec{x}_0$ Rotation d’axe $(C,\vec{z}_0)$ ou $(C',\vec{z}_0)$	$x_D(t)+x_C$ $\omega_{4/0}$ ou $\omega_{4'/0}$

Actions mécaniques

Actions	Torseurs
Couple moteur s’exerçant de 0 sur 3	$\{T_{M0\to1}\}=\left\{\begin{matrix}\vec{0}\\ C_m\vec{x}_0\end{matrix}\right\}_O$
Couple de frottement fluide interne ramené sur l’axe moteur 3	$\{T_{f0\to3}\}=\left\{\begin{matrix}\vec{0}\\ -C_f\dot{\theta}_3\vec{x}_0\end{matrix}\right\}_0$
Couple de rappel élastique sur 1 ou 1’ (lames flexibles)	$\{T_{r0\to1}\}=\left\{\begin{matrix}\vec{0}\\ -C_r\alpha\vec{z}_0\end{matrix}\right\}_A$ ou $\{T_{r0\to1'}\}=\left\{\begin{matrix}\vec{0}\\ -C_r\alpha'\vec{z}_0\end{matrix}\right\}_{A'}$
Effort de l’utilisateur sur 1 ou 1’	$\{T_{u\to1}\}=\left\{\begin{matrix}-F_u\vec{y}_0\\ \vec{0}\end{matrix}\right\}_E$ ou $\{T_{u\to1'}\}=\left\{\begin{matrix}+F_u\vec{y}_0\\ \vec{0}\end{matrix}\right\}_{E'}$
Effort de l’objet (déformable) sur 1 ou 1’	$\{T_{o\to1}\}=\left\{\begin{matrix}+F_0\vec{y}_0\\ \vec{0}\end{matrix}\right\}_B$ ou $\{T_{o\to1'}\}=\left\{\begin{matrix}-F_o\vec{y}_0\\ \vec{0}\end{matrix}\right\}_{B'}$

ANNEXE 5 - Schéma bloc

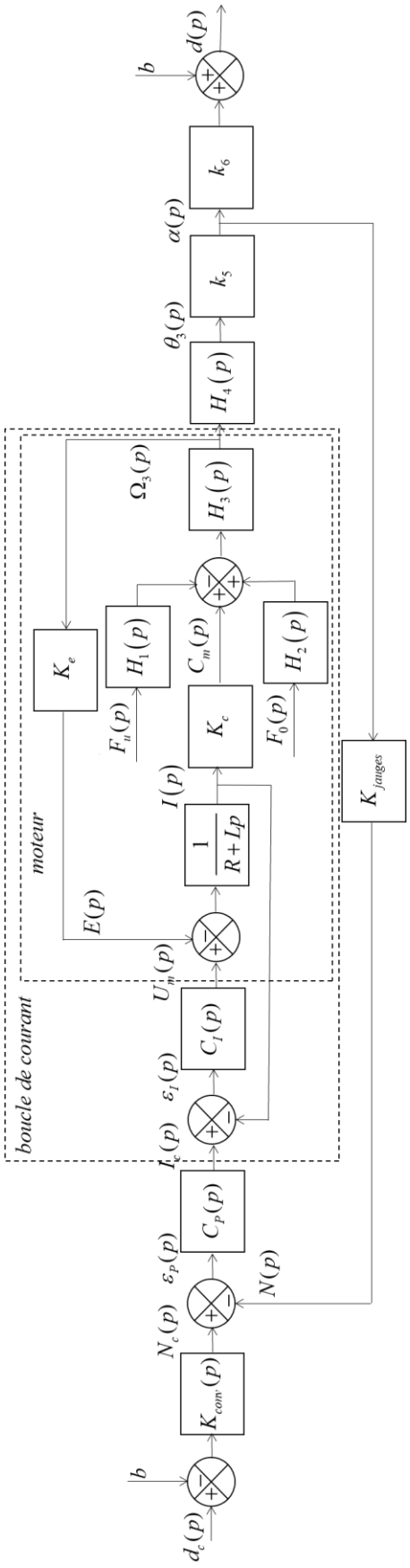


Figure 15 - Schéma bloc du contrôle asservi de la pince

ANNEXE 6 - Données du schéma bloc

Constituants du schéma bloc d'asservissement

Éléments modélisés	Caractéristiques ou fonctions de transfert
Convertisseur de consigne de position	K_{conv}
Correcteur de la boucle de position	$C_P(p)$
Correcteur de la boucle de courant	$C_I(p)$
Système de jauges de déformation (jauges, pont de Wheastone, et convertisseur analogique-numérique)	K_{jauges}
Moteur DC brusless	Résistance électrique de l'induit : R Inductance électrique de l'induit : L Constante de couple : K_c Constante de tension contre-électromotrice : K_e

Grandeurs physiques du schéma bloc d'asservissement

Notations	Grandeurs physiques	Unités
$d_c(p)$	Consigne d'ouverture de la pince	m
b	Ouverture au repos de la pince	m
$d(p)$	Ouverture de la pince	m
$N_c(p)$	Consigne d'ouverture convertie en grandeur numérique	inc (incréments)
$N(p)$	Mesure numérique de la position angulaire de la branche	inc (incréments)
$\varepsilon_P(p)$	Écart numérique de la boucle de position	inc (incréments)
$I_c(p)$	Consigne d'intensité du moteur	A
$\varepsilon_I(p)$	Écart de la boucle d'intensité	A
$U_m(p)$	Tension de l'induit du moteur	V
$E(p)$	Tension contrélectromotrice du moteur	V
$I(p)$	Intensité de l'induit du moteur	A
$C_m(p)$	Couple moteur	Nm
$F_u(p)$	Action de l'utilisateur sur la pince	N
$F_o(p)$	Action de l'objet saisi sur la pince	N
$\Omega_3(p)$	Vitesse angulaire du moteur	rad/s
$\theta_3(p)$	Position angulaire du moteur	rad
$\alpha(p)$	Position angulaire de la branche de la pince	rad

ANNEXE 7 - Diagrammes d'état

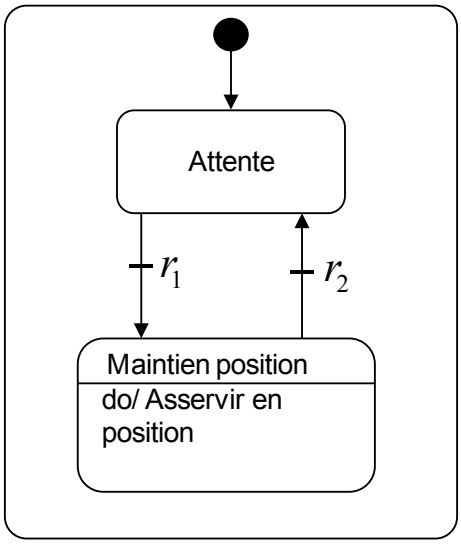


Figure 16 - Diagramme d'état pour blocage de la fermeture

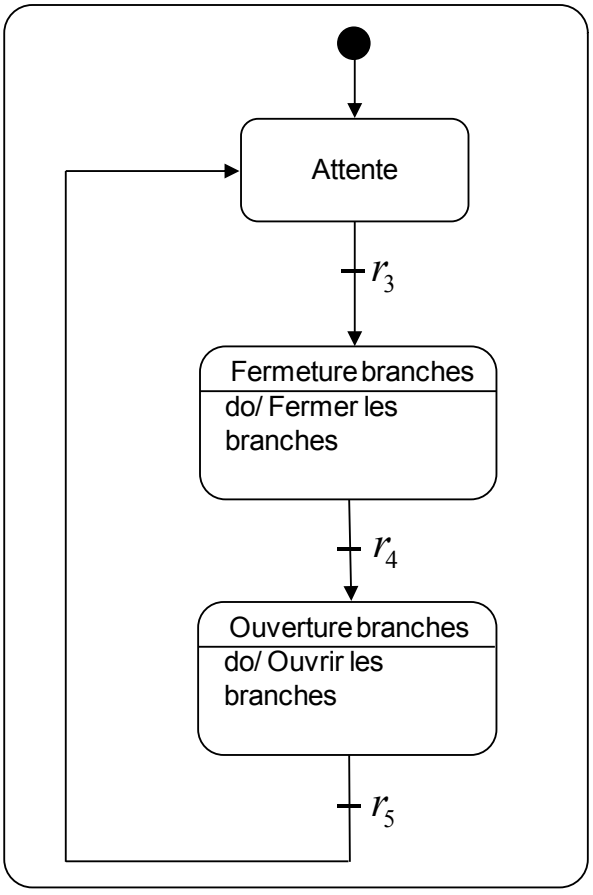


Figure 17 - Diagramme d'état pour simulation d'une pince brucelles inversée

FIN

IMPRIMERIE NATIONALE – 24 1108 – D'après documents fournis

CONCOURS COMMUN INP

Numéro d'inscription

Numéro de table

Né(e) le

Nom :

Prénom :

Emplacement QR Code

Filière : PSI

Session : 2024

Épreuve de : Sciences Industrielles de l'Ingénieur

Consignes

- *Remplir soigneusement l'en-tête de chaque feuille avant de commencer à composer*
- *Rédiger avec un stylo non effaçable bleu ou noir*
- *Ne rien écrire dans les marges (gauche et droite)*
- *Numéroter chaque page (cadre en bas à droite)*
- *Placer les feuilles A3 ouvertes, dans le même sens et dans l'ordre*

PSI7SI

DOCUMENT RÉPONSE

Ce Document Réponse doit être rendu dans son intégralité.

PINCE BRUCELLES INSTRUMENTÉE HAPTIQUE DE MICRO-MANIPULATION

Q1 - Cas d'utilisation et actions mécaniques appliquées sur la pince

	Manuelle	Collaborative	Maître	Esclave
F_u				
F_o				
C_m				

Q2 - Sous-exigence essentielle dans le cas d'utilisation manuelle

Q3 - Chaînes de puissance et d'information

1 :

2 :

3 :

4 :

5 :

6 :

7 :

8 :

NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

Q4 - Montrer que $\vec{\Omega}(2/0)=\vec{0}$. Nature du mouvement de 2 par rapport à 0

Q5 - Degré d'hyperstatisme de la demi-pince

Q6 - Degré d'hyperstatisme de la pince complète. Comparaison avec Q5

Q7 - Ouverture d en fonction de l'angle α et des données constantes

Q8 - Justification de l'allure de la courbe et valeurs de a et b tels que $d = a\,\alpha + b$

Q9 - Déplacement de l'écrou x_D en fonction de l'angle α . Expressions de d_1 , d_2 , d_3 et de d_4

Q10 - Gain K_D tel que $x_D = K_D\,\alpha$

Q11 - Ouverture d en fonction de l'angle moteur θ_3 . Variation minimale $\Delta\theta_3$ mesurable et variation minimale Δd correspondante (expressions littérales uniquement)

Q12 - Vitesse de rotation $\omega_{4/0}$ en fonction de la vitesse $\dot{\alpha}$. Gain K_G tel que $\omega_{4/0} = K_G \dot{\alpha}$

Q13 - Énergie cinétique $E_c(\Sigma/0)$ de l'ensemble $\Sigma = \{1,1',2,3,4,4'\}$

Q14 - Inertie équivalente J_{eq} rapportée sur l'axe moteur

Q15 - Puissance galiléenne des actions extérieures à l'ensemble Σ

Numéro d'inscription

Numéro de table

Né(e) le

Nom :

Prénom :

Emplacement QR Code

Filière : PSI

Session : 2024

Épreuve de : Sciences Industrielles de l'Ingénieur

Consignes

- *Remplir soigneusement l'en-tête de chaque feuille avant de commencer à composer*
- *Rédiger avec un stylo non effaçable bleu ou noir*
- *Ne rien écrire dans les marges (gauche et droite)*
- *Numéroter chaque page (cadre en bas à droite)*
- *Placer les feuilles A3 ouvertes, dans le même sens et dans l'ordre*

Q16 - Puissance des actions intérieures à l'ensemble Σ

Q17 - C_{eq}, f_{eq}, l_u et l_o tels que $J_{eq}\ddot{\theta}_3 + f_{eq}\dot{\theta}_3 + C_{eq}\theta_3 = -l_u F_u + l_o F_o + C_m$

Q18 - Couple moteur dans le cas de la pince maître

Q19 - Couple moteur dans le cas de la pince esclave

NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

Q20 - Validation du moteur en téléopération

Q21 - Couple moteur C_m en fonction de C_{eq} et de C_a, puis en fonction de C_r et de C_a

Q22 - Intensité moteur i en fonction de C_r et de C_a. Valeur de i pour $C_a = C_r$

Q23 - Fonction de transfert $H_4(p)$ et fonctions de transfert $H_1(p)$, $H_2(p)$ et $H_3(p)$

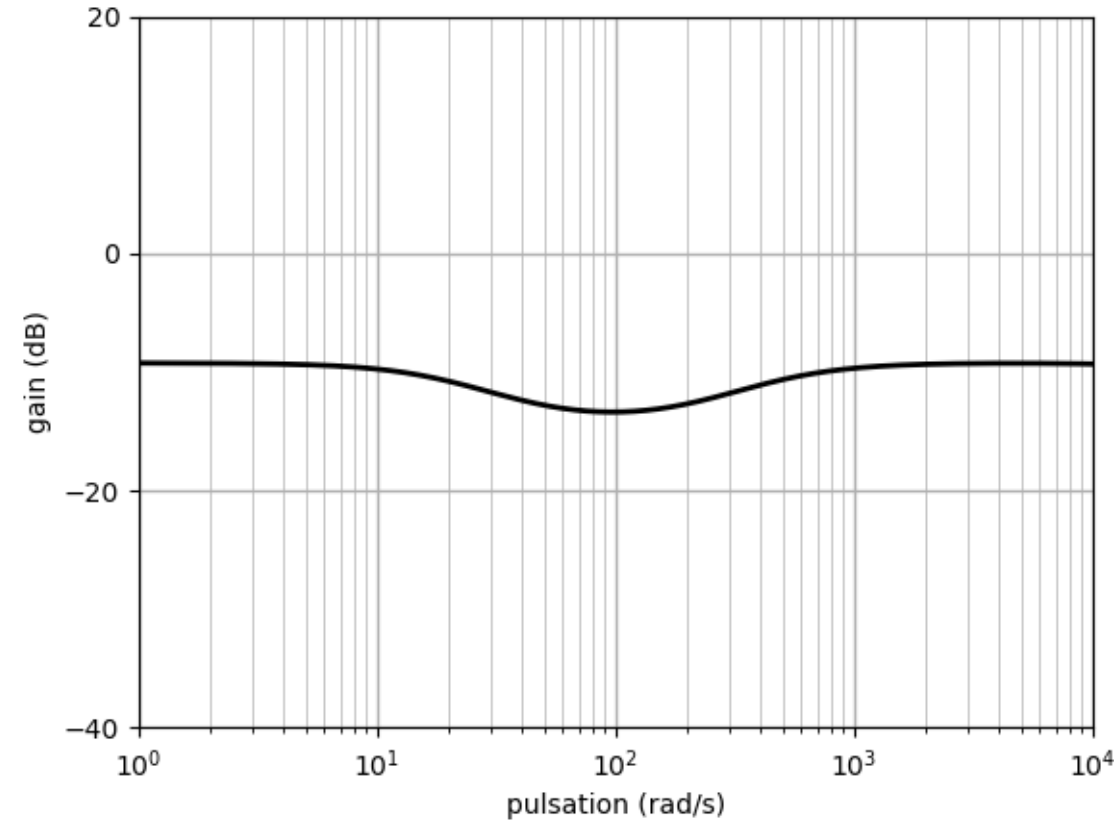
Q24 - Écart $\varepsilon_P(p)$ en fonction de $d_c(p)$ et de $d(p)$. Gain K_{conv} pour asservir correctement

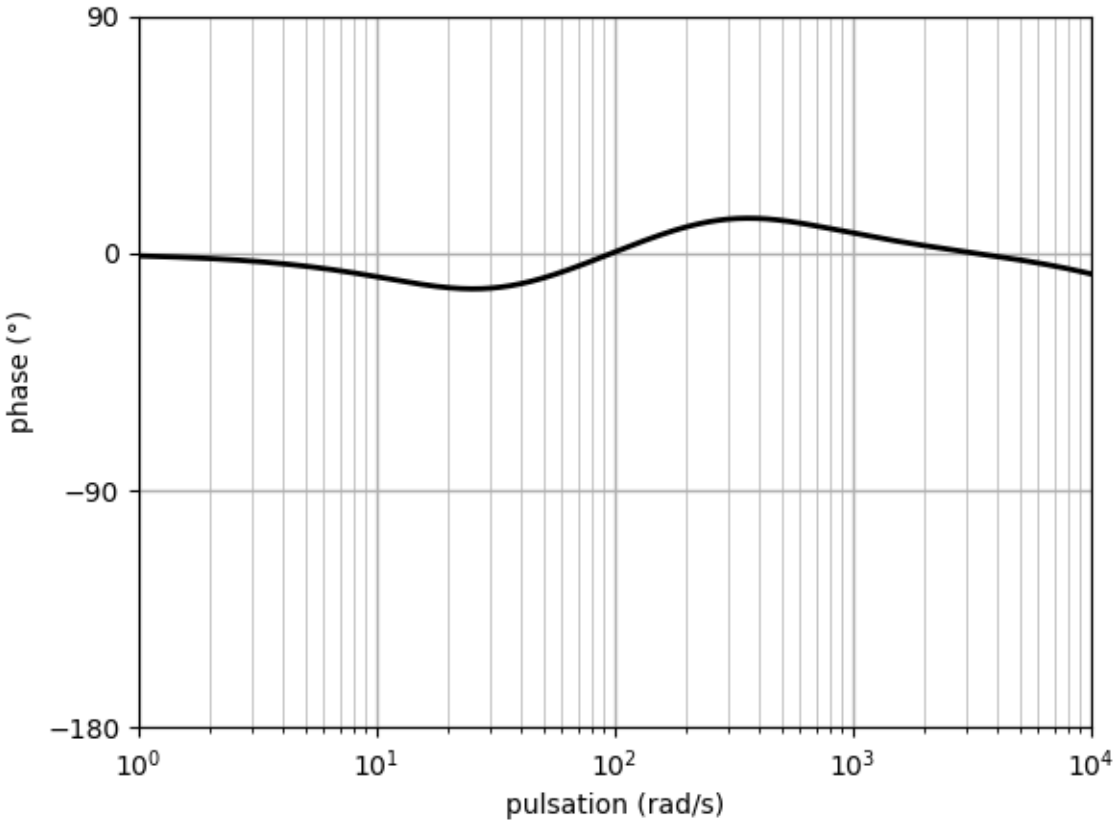
Q25 - Fonction de transfert en boucle ouverte (boucle de courant) non corrigée : $H_{BOI}(p)$.

Expressions de a_1, a_2, a_3, a_4 et de a_5

Q26 - Gain K_{pI} permettant de respecter l'exigence de précision

Q27 - Diagrammes de Bode du correcteur





Q28 - Respect des exigences de stabilité et de précision

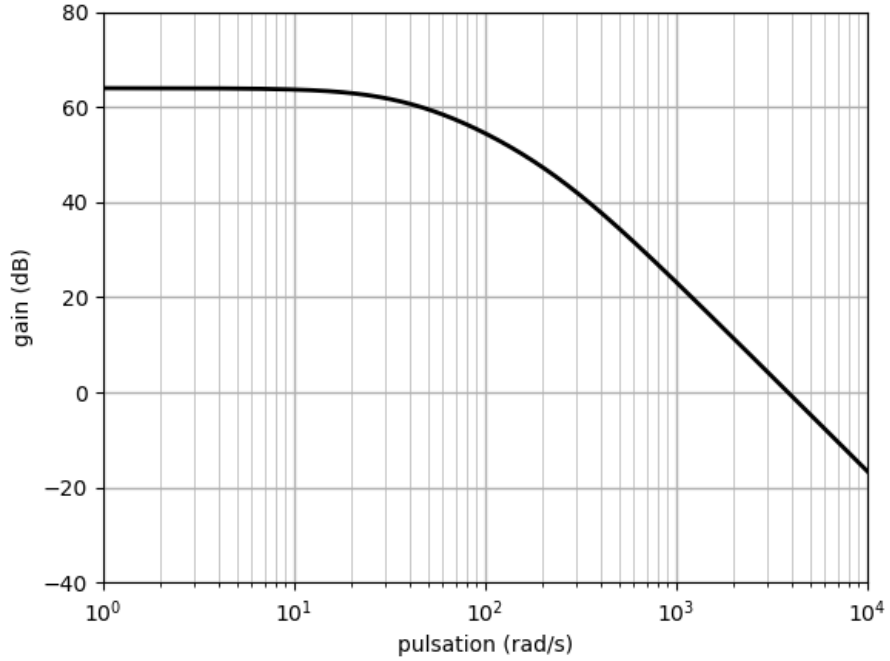
Q29 - Cas d'assistance du moteur et cas d'opposition

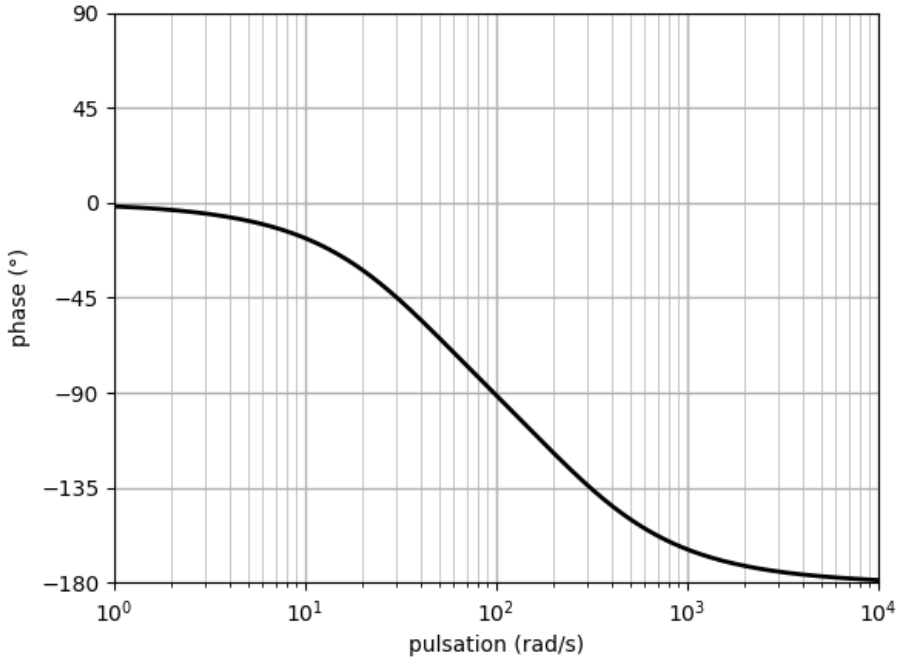
Q30 - Raideur naturelle C_r de la pince

Q31 - Justification du choix $C_P(p) = -1$ et respect de l'exigence de précision

NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

Q32 - Respect de l'exigence de stabilité & Q34 - Tracé des diagrammes du correcteur





Q33 - Méthodes pour obtenir les valeurs de a, T_a et de K_{pP}

Q35 - Choix de la constante de temps T_P

Q36 - Commentaires courbes et justification performances du retour haptique. Comparaison tensions et intensités

Q37 - Expression de r_1 et de r_2 pour franchir les transitions

Q38 - Expression de r_3 , r_4 et de r_5 pour franchir les transitions

FIN

Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de PSI chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Ingénierie système : besoin, exigences et diagrammes SysML
- Architecture fonctionnelle et structurelle : chaînes d'information et de puissance
- Modélisation des liaisons, graphe des liaisons et schéma cinématique
- Cinématique des mécanismes : composition des mouvements, contact ponctuel, lois entrée-sortie et fermetures
- Cinématique du solide : paramétrage, vitesse, taux de rotation et torseur cinématique
- Cinétique : torseurs cinétique et dynamique, énergie cinétique, inertie équivalente
- Dynamique des systèmes de solides : principe fondamental, stratégie d'isolement, équilibrage
- Amplificateur linéaire intégré, stabilité et rétroaction

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière :
écrire sur WhatsApp

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/e3a/psi