

DS MPSI, avril 2025, durée 1h

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

Cette épreuve comporte :

- ✓ Un exercice.
- ✓ Un problème :
 - Sujet pages 2/20 à 6/20.
 - 3 annexes, pages 13/20 à 16/20.
 - Un document réponses pour la question 1.

Aide du professeur :

- ✓ Q9 : Projeter sur $\vec{y}_2 \dots$
- ✓ Q12 : Roulement glissement en I : $\vec{V}(I \in 4/1) = \vec{0}$

Exercice 1 Système de levage (CCP MP 11)

Dans le cadre de la maintenance des tramways, il est nécessaire d'intervenir sous le tramway et donc de le soulever entièrement.

Les colonnes de levage sont des unités indépendantes mobiles que l'on peut déplacer manuellement grâce à des roues escamotables. Elles sont constituées d'un chariot de levage guidé par 4 galets roulant à l'intérieur d'une colonne (rails en tôle pliée).

L'entraînement du chariot se fait par une vis à filet trapézoïdal, mise en rotation par un moto-réducteur-frein asynchrone. On met en place les colonnes au niveau de la plateforme du tramway à soulever, aux endroits prévus à cet effet.

L'objectif est de déterminer la vitesse de levée du chariot.



On donne : $Z_{12} = 15$; $Z_{21} = 75$; $Z_{23} = 14$; $Z_{32} = 35$

Pas du système vis-écrou : $p = 5$ mm

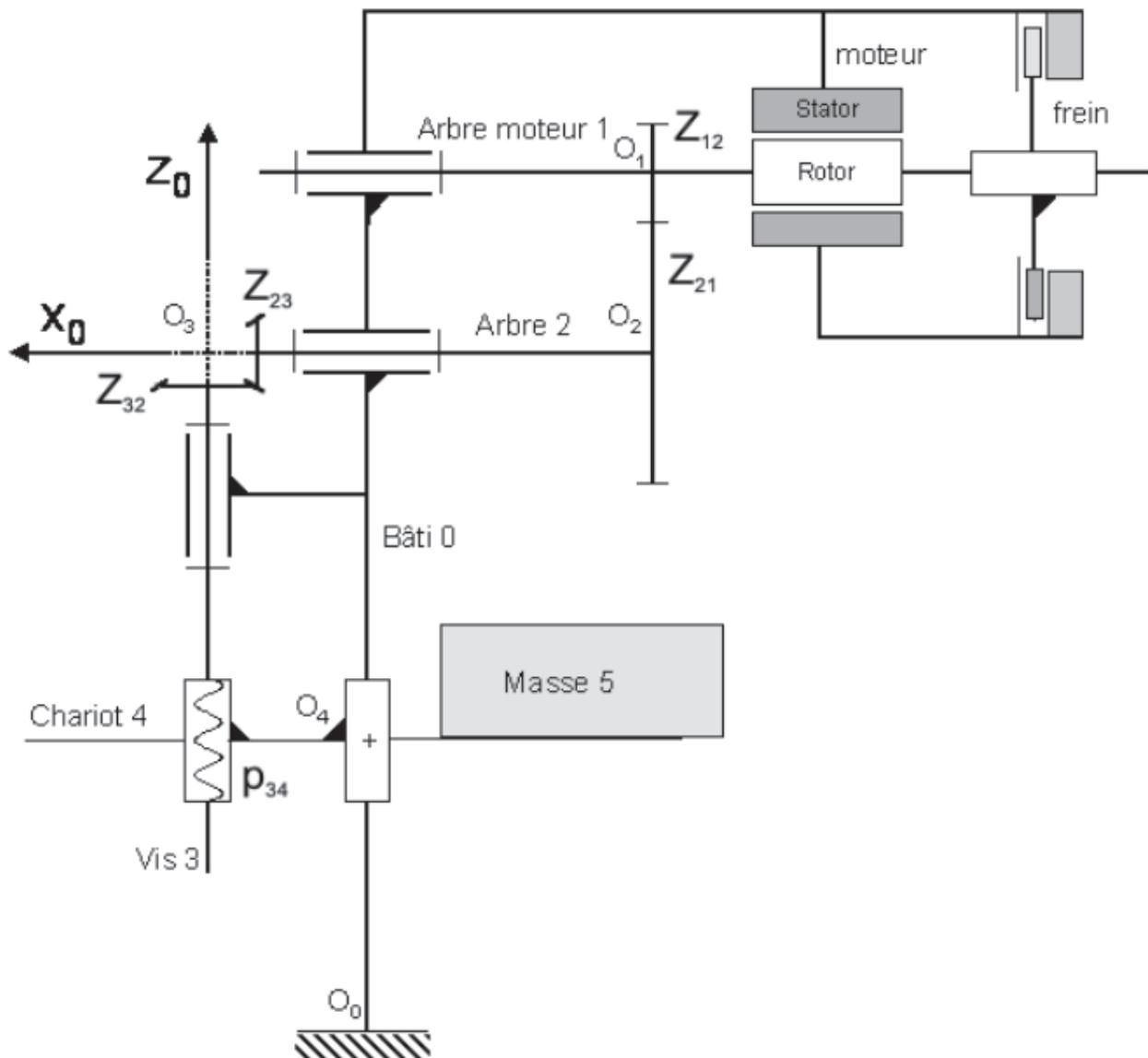
Vitesse de translation du chariot V_L .

Rotation de l'arbre moteur 1 par rapport au bâti 0 : ω_{10} .

Rotation de l'arbre 2 par rapport au bâti 0 : paramètre ω_{20}

Rotation de la vis 3 par rapport au bâti 0 : paramètre ω_{30}

La vitesse de rotation du moteur est : $\omega_{10} = \omega_{\text{moteur}} = 1500 \text{ tr. min}^{-1}$.



Question

Déterminer la vitesse de levée V_L en mm.s^{-1} .

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**).

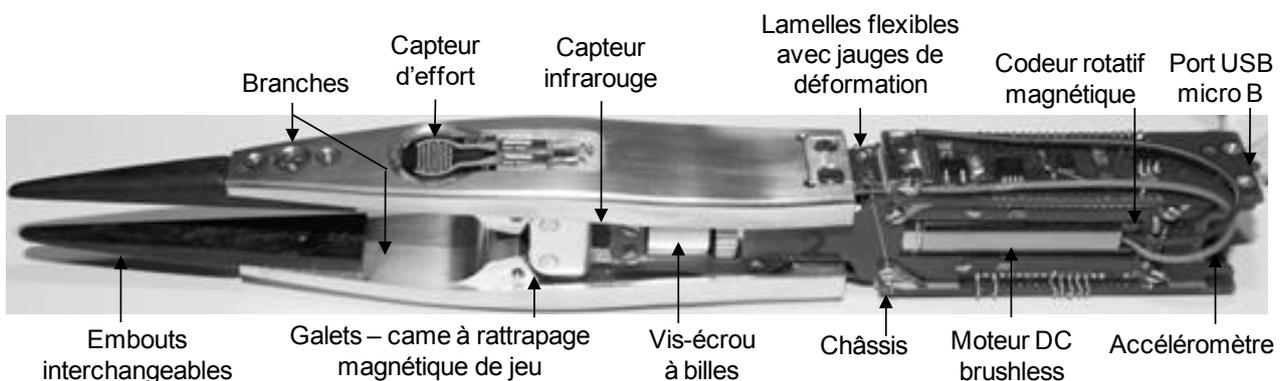


Figure 3 - Pince instrumentée – vue détaillée

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

Q4. Montrer par deux compositions des vitesses angulaires que $\vec{\Omega}(2/0) = \vec{0}$. 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 : $d = \overline{BB^1} \cdot \vec{y}_0$ (**figure 14, annexe 3**).

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

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 $\text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ et b en m , tels que : $d = a\alpha + b$.

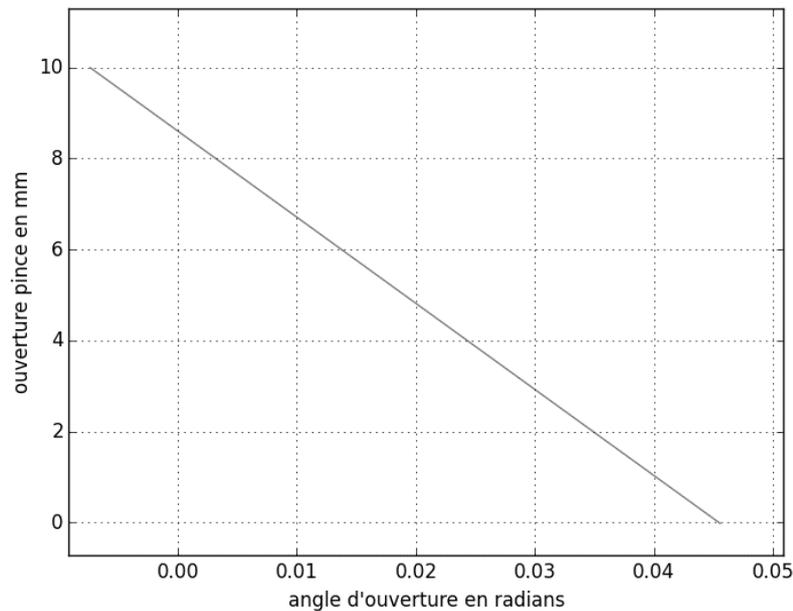


Figure 4 - Ouverture de la pince en fonction de l'angle d'ouverture α

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 $\text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ 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. Dédurre 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.

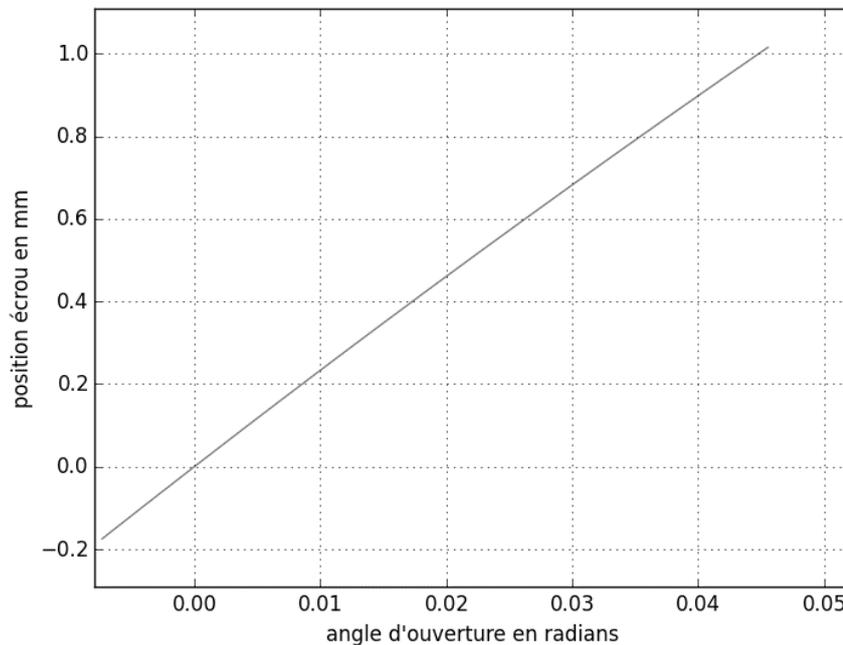


Figure 5 - Position de l'écrou en fonction de l'angle α de la branche

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 :~~

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

ANNEXE 1 - Diagrammes SysML et chaînes fonctionnelles

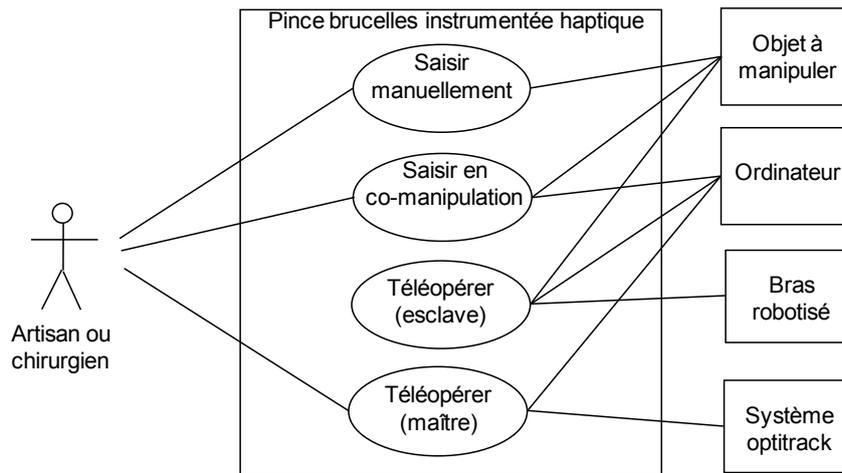


Figure 9 - Diagramme SysML des cas d'utilisation

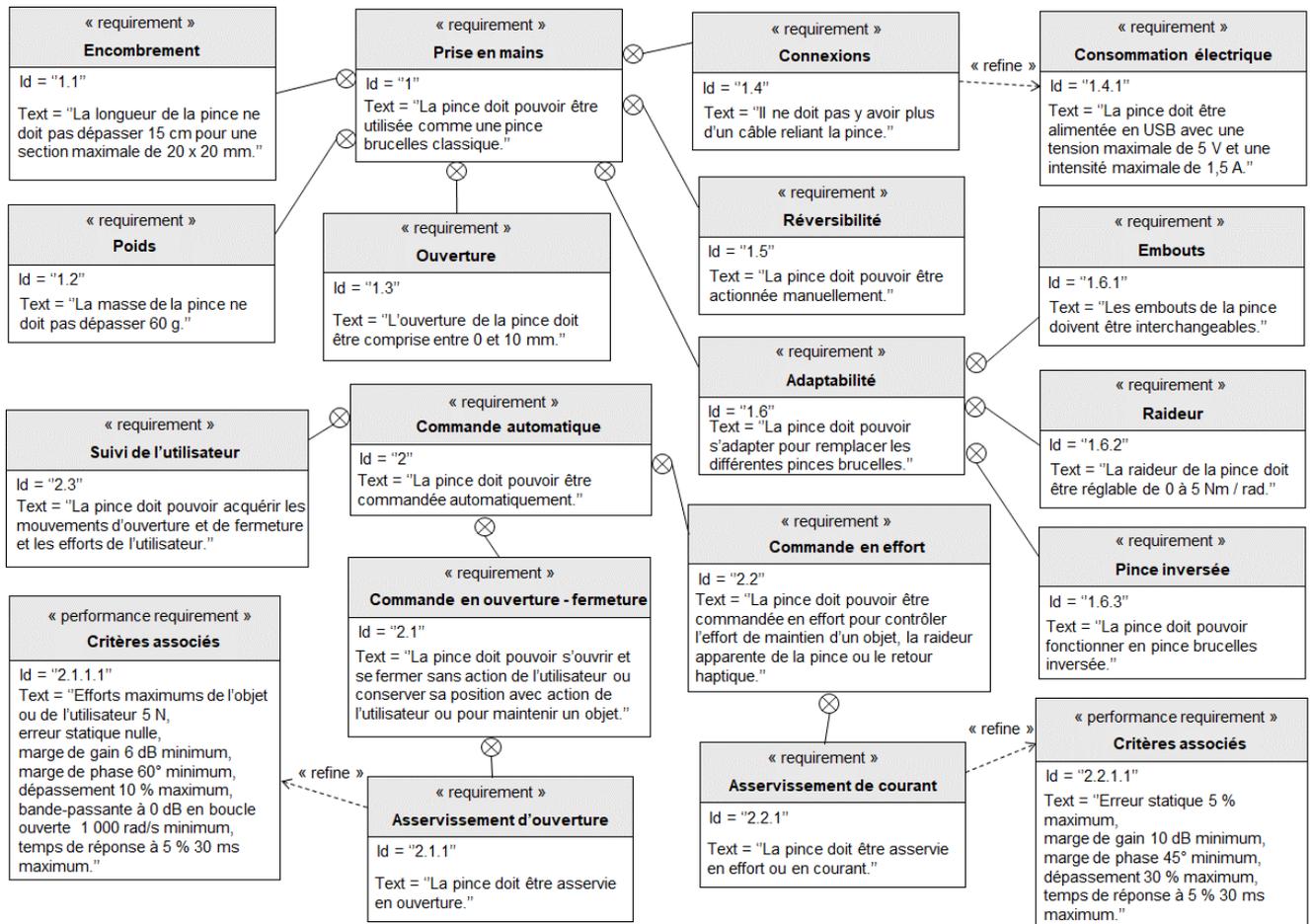


Figure 10 - Diagramme SysML partiel des exigences

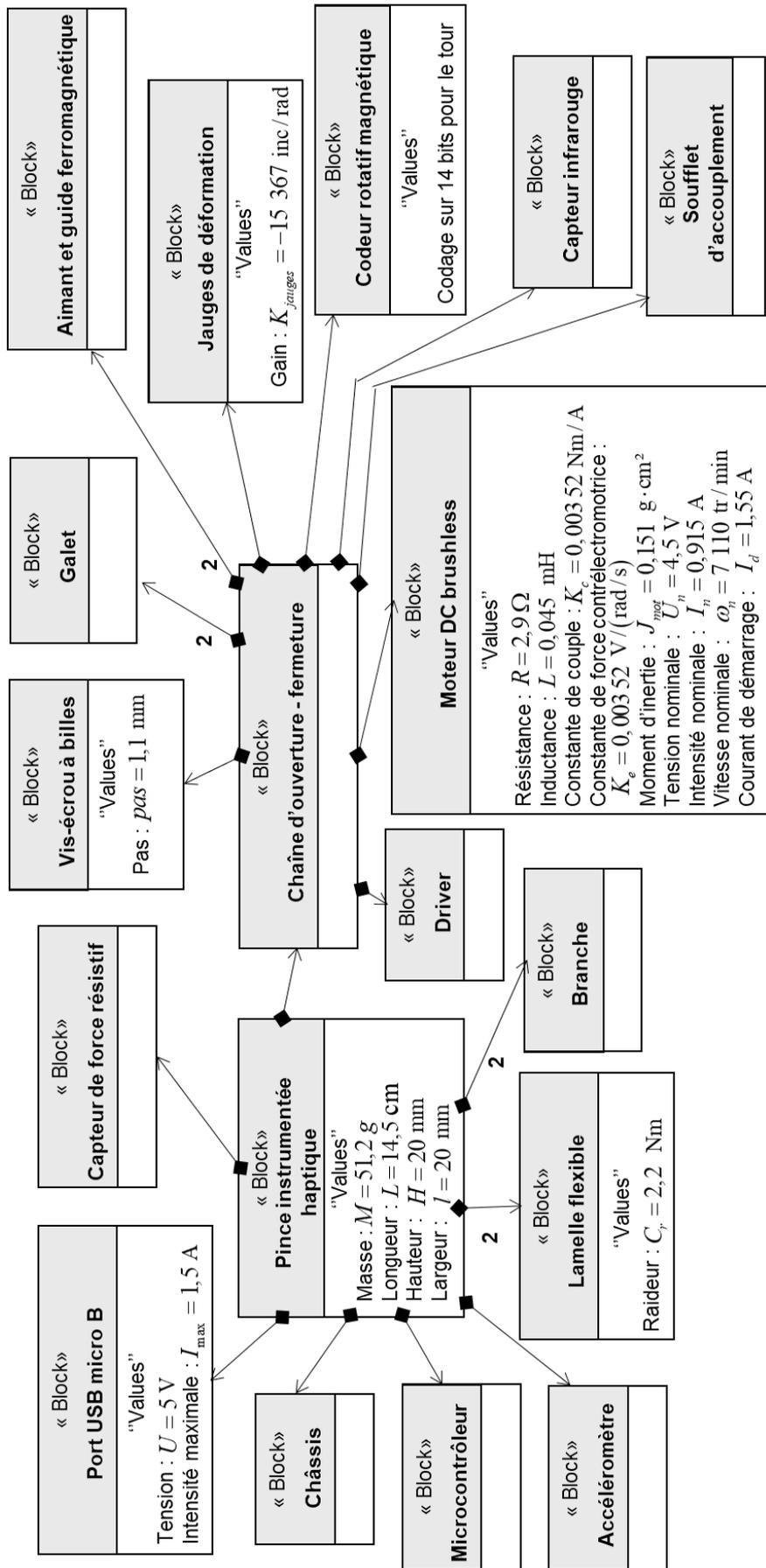


Figure 11 - Diagramme SysML de définition de blocs

ANNEXE 2 - Chaînes fonctionnelles

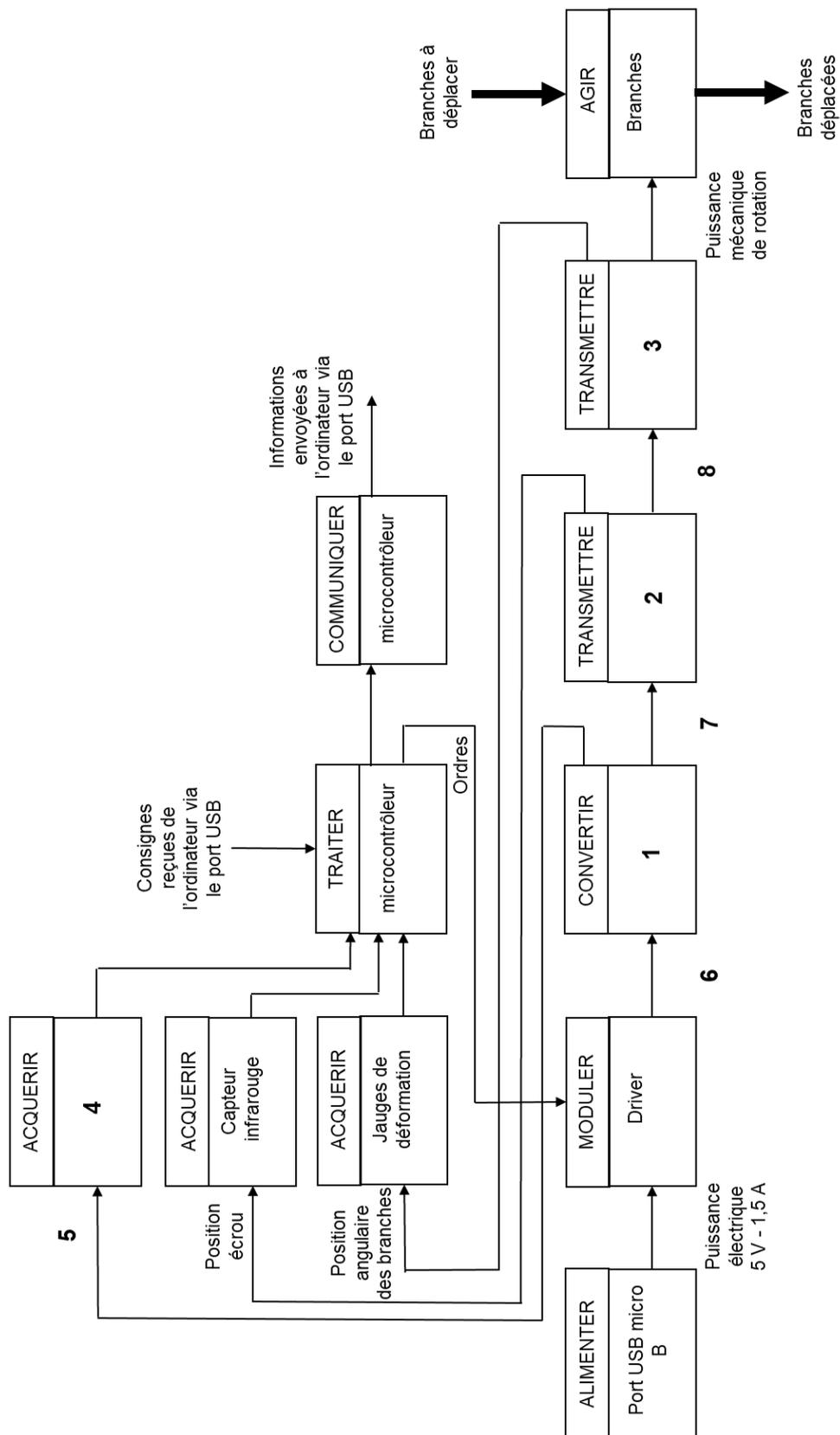


Figure 12 - Chaînes de puissance et d'information d'actionnement de la pince

ANNEXE 3 - Modèles mécaniques

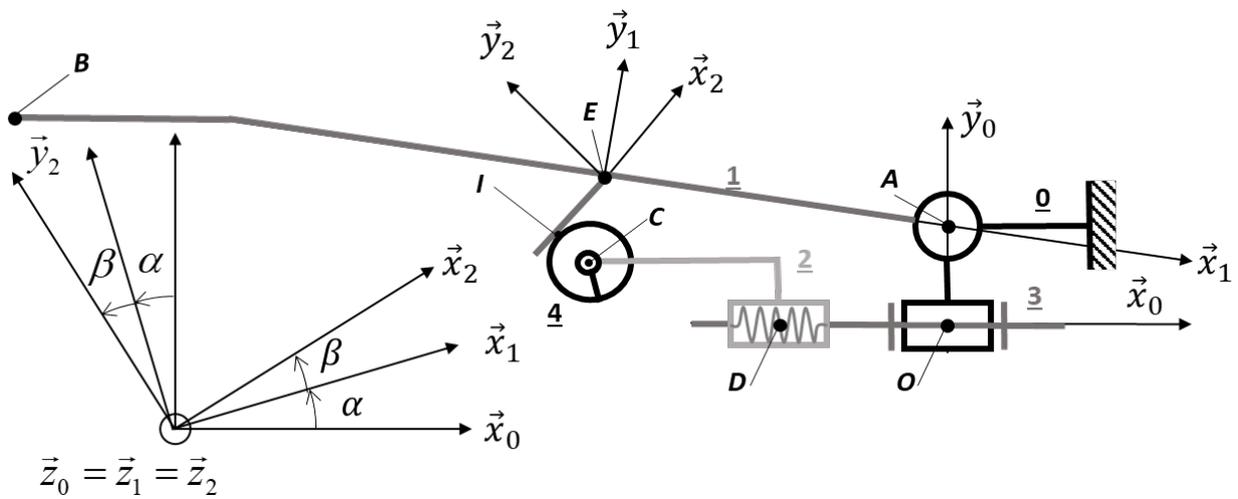


Figure 13 - Modèle géométrique de la demi-pince

Paramètres variables

$\alpha = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1)$
 $\overline{OD} = x_D \vec{x}_0$
 $\overline{EI} = x_I \vec{x}_2$ avec $x_I < 0$
 et α, x_D et x_I variables

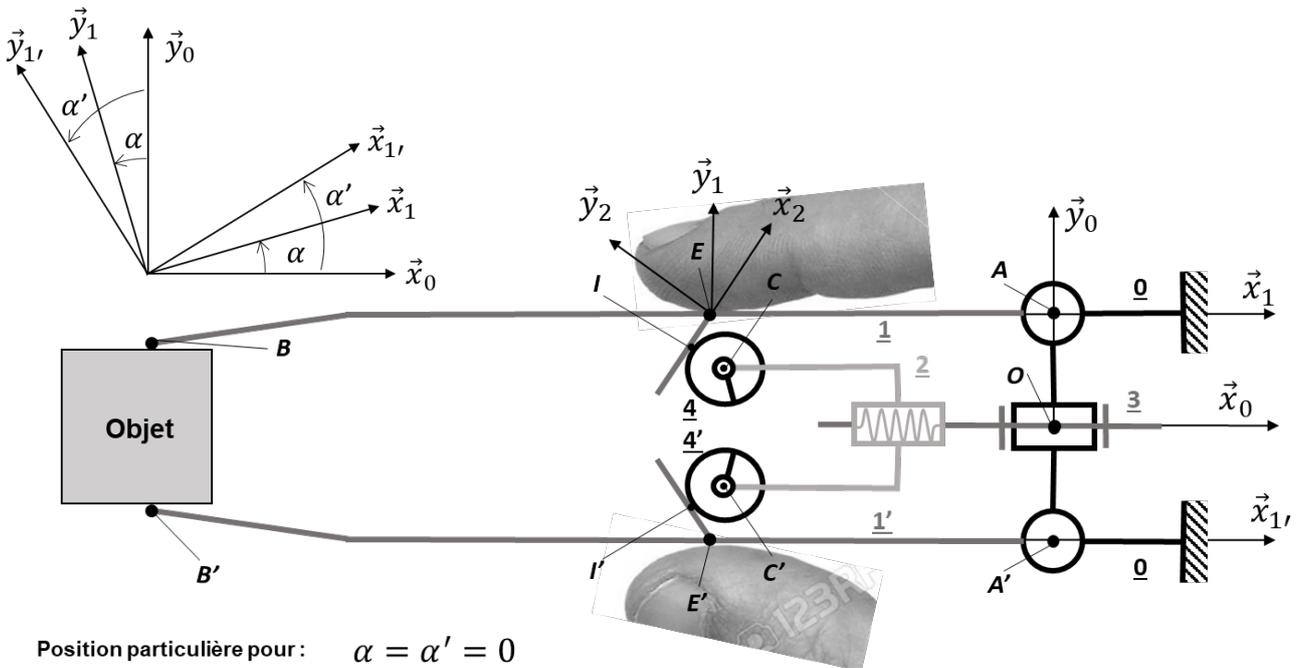
Données constantes

$\beta = (\vec{x}_1, \vec{x}_2) = (\vec{y}_1, \vec{y}_2) = 60^\circ$
 $\overline{OA} = y_A \vec{y}_0$
 $\overline{AE} = x_E \vec{x}_1$ avec $x_E < 0$
 $\overline{CI} = R_g \vec{y}_2$

$\overline{DC} = x_C \vec{x}_0 + y_C \vec{y}_0$ avec $x_C < 0$
 $\overline{AB} = x_B \vec{x}_1 + y_B \vec{y}_1$
 avec $x_B < 0$ et $y_B < 0$

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

$$x_D = \frac{pas}{2\pi} \theta_3 \text{ avec } \theta_3 = 0^\circ \text{ si } \alpha = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1) = 0^\circ$$



Position particulière pour : $\alpha = \alpha' = 0$

Figure 14 - Modèle géométrique de la pince complète

