

# CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

—

SESSION 2025

—

## **SCIENCES DE L'INGÉNIEUR**

(Classes de terminale voie générale spécialité sciences de l'ingénieur)

Durée : 5 heures

—

*L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.  
L'usage de la calculatrice sans mémoire « type collègue » est autorisé.*

### Consignes aux candidats

- Ne pas utiliser d'encre claire
- N'utiliser ni colle, ni agrafe
- Ne joindre aucun brouillon
- Ne pas composer dans la marge
- Numéroté chaque page en bas à droite (numéro de page / nombre total de pages)
- Sur chaque copie, renseigner l'en-tête + l'identification du concours :

Concours / Examen : CGL Epreuve : Sciences de l'ingénieur Matière : SCIN Session : 2025

**Tournez la page S.V.P.**







---

## Les cobots, l'automatisation à taille humaine

---



Ce sujet comporte trois parties :

- Énoncé pages 2 à 16 ;
- Annexes 1 à 3 pages 17 à 20 ;
- Dossier réponse 1 à 3 (à rendre avec la copie) pages 21 à 22.

Il est conseillé au candidat de vérifier que tous les documents définis ci-dessus sont présents.  
**Les documents réponses doivent être rendus avec la copie même s'ils n'ont pas été complétés.**

# PARTIE 1. Présentation des cobots

## 1.1. Contexte

Les robots collaboratifs, ou cobots sont en train de révolutionner le secteur de la robotique. Ils ont été pensés pour interagir et coexister avec l'homme (figure 1). Ils permettent ainsi de réduire la pénibilité du travail, en maniant des charges trop lourdes et d'améliorer la productivité. C'est sans doute sa plus grande force. Malgré une forme simple, ils peuvent effectuer toute une variété de tâches trop épuisantes, difficiles ou peu gratifiantes pour l'humain ; évitant des tâches dangereuses et qui peuvent mettre en péril la santé du personnel.



Figure 1 : cobot en action



Figure 2 : vue générale de Morfose

Si le cobot peut en théorie revêtir de multiples formes, la plus commune est celle d'un bras robotisé et articulé, comme le robot Morfose, figure 2, capable de visser, poncer, saisir, frapper, coller, souder, peindre ... En fonction de sa programmation (extrêmement simple et ne nécessitant pas de compétences robotiques poussées), ou de ses extensions (capteurs de force, pinces, etc.), il peut remplir énormément de tâches.

La popularité croissante du cobot ne s'explique pas uniquement par ses capacités, mais également par le coût de l'application et de son exploitation. Le coût est encore réduit grâce à sa polyvalence. Là où les robots étaient auparavant faits pour une unique tâche, le cobot est reprogrammable à l'envie. Il n'est ainsi pas nécessaire d'acheter une autre machine en cas d'apparition d'un nouveau besoin. La programmation est simple et ne nécessite pas l'intervention coûteuse d'un spécialiste. Les différents modules du Morfose sont donnés figure 3.

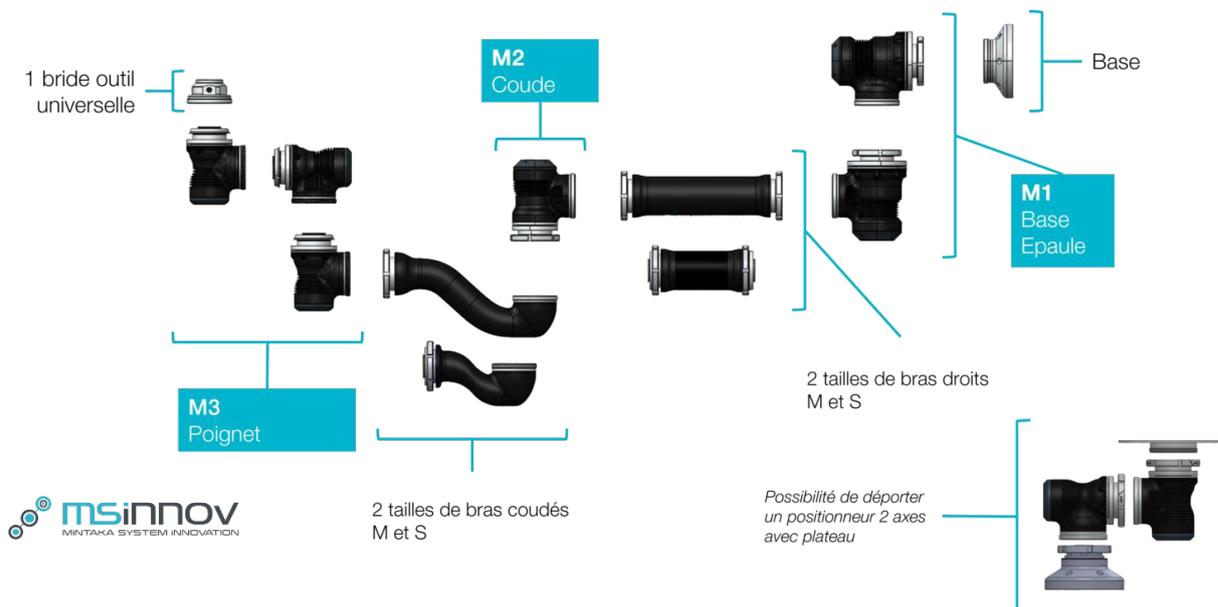


Figure 3 : les différents modules du Morfose



L'écosystème autour du cobot peut s'adapter, en effet le cobot est le cœur d'une plateforme accueillant accessoires, périphériques et outils chaque mois plus nombreux, comme par exemple, un pistolet de peinture (figure 4).

Un même cobot est ainsi capable de profiter de fonctionnalités adaptées aux besoins immédiats de l'atelier.

Figure 4 : pistolet de peinture installé en bout de bras

Enfin, l'argument de la sécurité est important : relativement petits et légers, les cobots ne sont pas dangereux pour l'homme. Programmés pour s'arrêter dès qu'ils percutent (avec douceur) un obstacle, ils ne nécessitent pas l'investissement d'une cage de sécurité ou autre matériel associé. Ils respectent les dernières normes de sécurité en vigueur et sont ainsi, bien plus facile à implémenter dans une usine que des bras articulés de robots classiques.

### 1.2. Problématique du sujet

L'étude porte sur un robot modulaire et collaboratif (voir Annexe 1 – Diagramme des exigences). Cette étude doit répondre à la problématique suivante :

**« Comment peindre un objet sur toute sa surface, sans surépaisseur, avec une cadence minimale et en toute sécurité ? »**

**Question 1** Citer trois intérêts pour une entreprise d'utiliser un cobot (voir Partie 1. Présentation et Annexe 1- Diagramme des exigences).

## PARTIE 2. Choix du type de cobot

### 2.1. Robot type SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm)

*L'objectif est de vérifier la compatibilité d'un robot 3 axes avec le volume d'intervention du robot.*

Le plus petit des cobots est un robot 3 axes, dit de type SCARA.

La figure 5 montre la représentation cinématique ainsi que le paramétrage associé aux différents solides et aux liaisons. La figure 6 fournit une vue générale du robot SCARA.

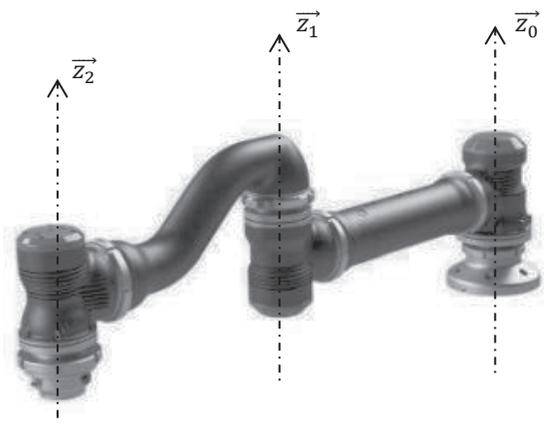
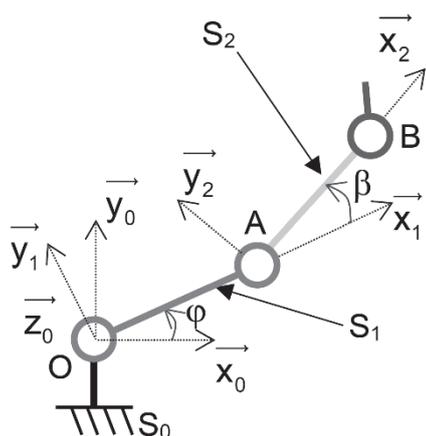


Figure 5 : schéma cinématique plan et paramétrage

Figure 6 : vue générale de robot SCARA

Un pistolet de peinture est en rotation autour de l'axe  $(B, \vec{z}_0)$ .

L'ensemble des repères sont considérés comme orthonormés directs.

Données :

$$\vec{OA} = L_1 \cdot \vec{x}_1 ;$$

$$\vec{AB} = L_2 \cdot \vec{x}_2 ;$$

Valeur numérique :  $L_1 = L_2 = 510 \text{ mm}$ .

- Question 2** Expliquer les différents mouvements que peut faire ce robot. Citer les axes concernés.
- Question 3** Indiquer la zone d'intervention (surface ou volume) de ce type de robot.
- Question 4** Conclure quant à la zone que pourrait peindre ce robot et sur le respect de la problématique soulevée dans la partie 1.2.

## 2.2. Modification du cobot

*L'objectif est d'ajouter un ou des modules afin de vérifier le volume d'intervention du robot.*

Pour améliorer cette base de cobot et afin d'obtenir la zone de travail exigée par la problématique, l'entreprise peut modifier ce cobot en y ajoutant des accessoires, bras ou épaules motorisées supplémentaires (figure 7).

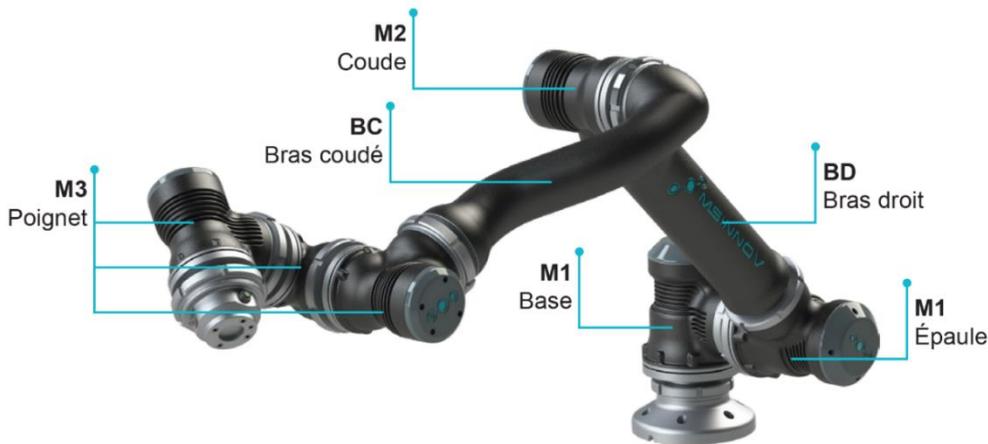


Figure 7 : cobot modifié

- Question 5** En comparant le robot SCARA et celui présenté sur la figure 7, indiquer ce qui doit être ajouté au robot pour répondre au critère de la zone d'intervention de la problématique associée à l'exigence 1.4.3.2 du diagramme des exigences. Les différents modules sont présentés sur la figure 3.

Les figures 8 et 9 permettent de présenter les parties mâles et femelles à assembler au niveau de chaque module.

Taroudage sur bague extérieur mobile

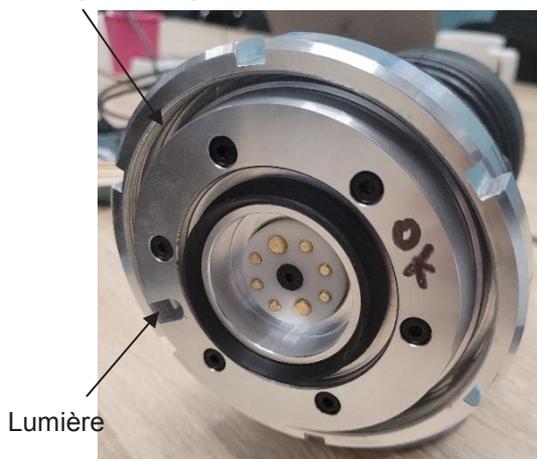


Figure 8 : photo de la partie mâle

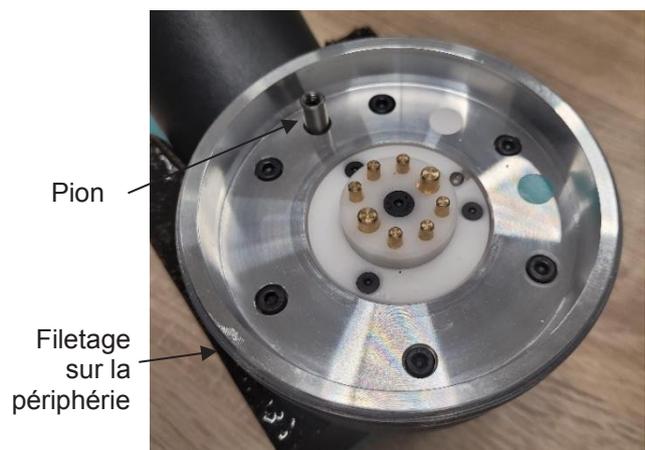


Figure 9 : photo de la partie femelle

- Question 6** Au regard des éléments à assembler, détailler la procédure à mener pour ajouter un module au cobot.

## PARTIE 3. Déplacement et dimensionnement

### 3.1. Déplacement du pistolet de peinture

*L'objectif est de programmer un déplacement horizontal du pistolet de peinture.*

Ce cobot, permettant de peindre un objet, doit déplacer un pistolet (effecteur) en bout de poignet (solide  $S_5$ ). Le schéma cinématique simplifié et la vue générale du cobot 5 axes sont présentés figures 10 et 11. Dans cette partie, le robot doit peindre des bandes horizontales.

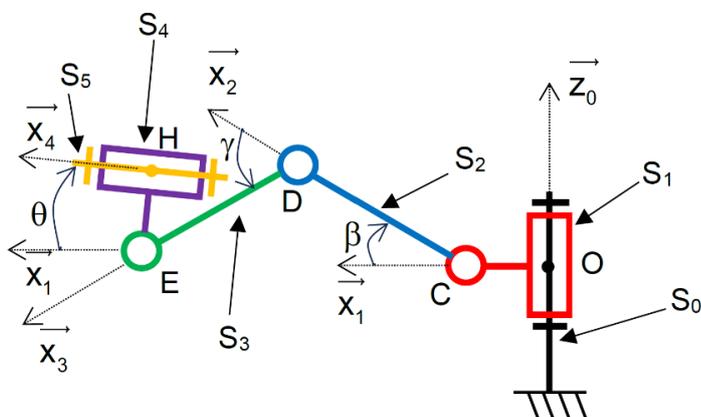


Figure 10 : schéma cinématique simplifié du cobot 5 axes



Figure 11 : vue générale du cobot 5 axes

**Question 7** Dessiner le graphe des liaisons en précisant les axes.

Pour la suite du sujet et en vue de simplifier l'étude, les rotations autour des axes  $\vec{z}_0$  et  $\vec{x}_4$  ne sont pas prises en compte.

Le schéma cinématique plan simplifié du cobot 5 axes est représenté figure 12.

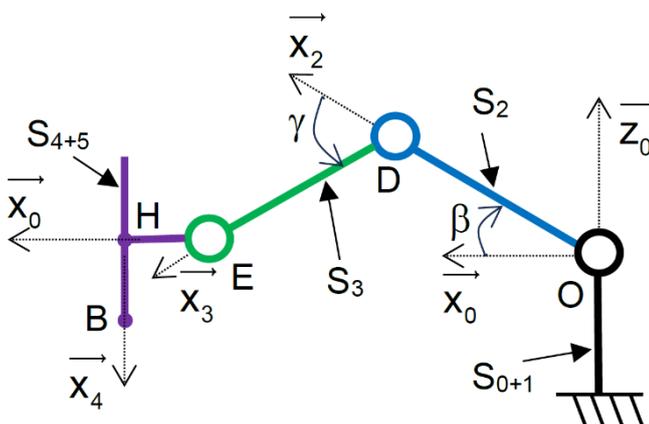


Figure 12 : schéma cinématique simplifié du cobot 5 axes dans le plan  $(\vec{x}_0, \vec{z}_0)$

En vue de préparer la programmation de la trajectoire du point  $\mathbf{B}$ , il faut déterminer  $\vec{OB}$  dans la base  $\mathbf{0}$  pour définir  $\mathbf{X}$  ( $\mathbf{X}$ , abscisse du point  $\mathbf{B}$  dans le repère  $R_0$ ). Le pistolet de peinture reste en position verticale, l'angle  $\theta = (\vec{x}_1, \vec{x}_4)$  est fixe au cours du temps, avec  $\theta = \frac{\pi}{2}$ .

**Question 8** Compte tenu de la nouvelle modélisation, **indiquer** l'hypothèse simplificatrice qu'il est possible de poser.

**Question 9** **Préciser** le type de mouvement du pistolet de peinture ( $S_{4+5}$ ) par rapport à la base  $\mathbf{0}$ .

Données :

- le repère  $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  est lié à la base, notée **0** (la classe d'équivalence cinématique **0** est maintenant constituée de **0** et **1**) ;
- le repère  $R_2(O, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$  est lié au bras droit, noté **2**, avec  $\beta(t) = (\vec{x}_1, \vec{x}_2) = (\vec{z}_1, \vec{z}_2)$  l'angle de rotation du bras droit **2** par rapport à l'épaule **1** ;
- le repère  $R_3(D, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$  est lié au bras coudé, noté **3**, avec  $\gamma(t) = (\vec{x}_2, \vec{x}_3) = (\vec{z}_2, \vec{z}_3)$  l'angle de rotation du bras coudé **3** par rapport au bras droit **2** ;
- le repère  $R_4(E, \vec{x}_4, \vec{y}_4, \vec{z}_4)$  est lié au poignet + pistolet de peinture, noté **4+5**, avec  $\theta(t) = (\vec{x}_0, \vec{x}_4) = (\vec{z}_0, \vec{z}_4) = \frac{\pi}{2}$  l'angle de rotation de l'ensemble **4+5** par rapport à la base **0** ;
- $\vec{OD} = L_1 \cdot \vec{x}_2$  ;  $\vec{OC} = \vec{0}$  ;  $\vec{DE} = L_2 \cdot \vec{x}_3$  ;  $\vec{EH} = d \cdot \vec{x}_0$  ;  $\vec{HB} = -e \cdot \vec{z}_0$  ,  $L_1 = L_2 = L$  ;  $\beta = -2 \cdot \gamma$ .

Les figures de paramétrage sont représentées sur les figures 13.

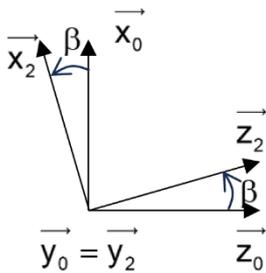


Figure 13-a

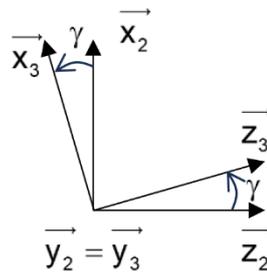


Figure 13-b

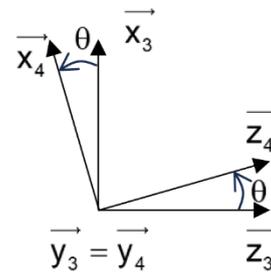


Figure 13-c

Figures 13 : figures de paramétrage

**Question 10** Pour chaque figure de paramétrage, **donner** le vecteur rotation associé.

**Question 11** **Préciser** les paramètres géométriques (angles et/ou longueurs) à prendre en compte lors de l'écriture de la loi entrée/sortie qui permet de déterminer l'abscisse du point **B**.

**Question 12** **Déterminer** l'expression du vecteur  $\vec{OB}$ , le plus simplement possible (sans faire de projection).

Rappel :  $\cos a \cdot \cos b - \sin a \cdot \sin b = \cos(a+b)$

**Question 13** En projetant  $\vec{OB}$  dans le repère  $R_0$ , **déterminer** la relation :  $\vec{OB} \cdot \vec{x}_0 = X$  en fonction de  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $d$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ . **Simplifier** l'équation afin d'obtenir une équation du type :  $X = f(L, d, \beta)$ .

La fonction  $X=f(\beta)$  a été tracée sous Excel et est représentée figure 14.

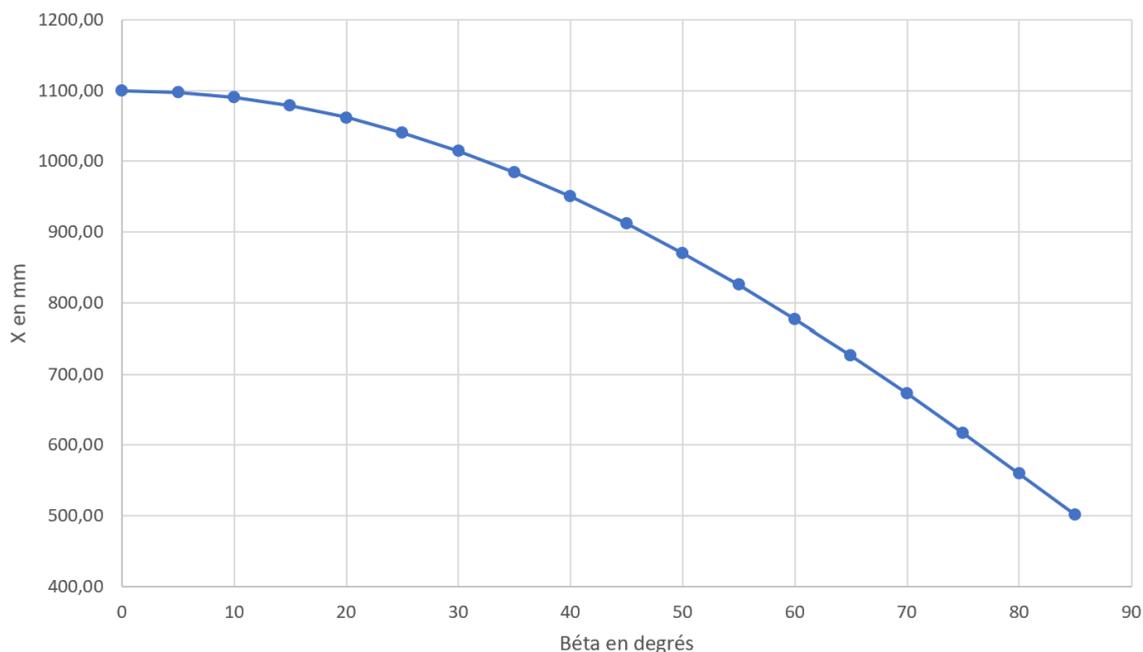


Figure 14 : courbe représentant X en fonction de  $\beta$

- Question 14** À partir de la courbe figure 14, **indiquer** s'il est possible de linéariser X sur toute la zone d'évolution de l'angle  $\beta$ . Si non, **préciser** sur quel intervalle la linéarisation peut être considérée.
- Question 15** **Proposer** un modèle linéaire sur l'intervalle [30, 85]. **Donner** les avantages et inconvénients d'avoir un modèle linéaire.
- Question 16** **Compléter** la ligne du programme en Python du document-réponse DR1 qui permet de tracer la droite trouvée précédemment.

### 3.2. Dimensionnement des actionneurs

*L'objectif est de valider la compatibilité du moteur choisi avec les exigences du robot.*

Le cobot doit déplacer une charge utile {pistolet de peinture + réservoir} de 20 kg verticalement. Il est configuré dans la position la plus défavorable, présentée sur la figure 15.

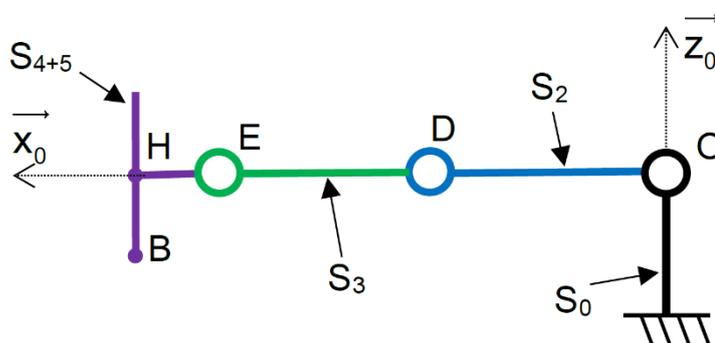


Figure 15 : schéma cinématique simplifié du cobot 5 axes dans la position la plus défavorable

Trois moto-réducteurs permettent de piloter les mouvements des bras 2, 3 et 4, positionnés respectivement en O, D et E.

Les couples articulaires fournis par ces moto-réducteurs autour de leurs axes respectifs sont tels que :

$$\overrightarrow{C_{m1 \rightarrow 2}} = -C_{12} \cdot \overrightarrow{Y_0}, \quad \overrightarrow{C_{m2 \rightarrow 3}} = -C_{23} \cdot \overrightarrow{Y_0}, \quad \overrightarrow{C_{m3 \rightarrow 4}} = -C_{34} \cdot \overrightarrow{Y_0}.$$

Si un solide « i » a une masse « m<sub>i</sub> » non négligeable, « G<sub>i</sub> » correspond à la position du centre de gravité de ce solide.

Données :

- le vecteur gravité est  $\vec{g} = -g \cdot \vec{z}_0$  avec  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  ;
- $\overrightarrow{OD} = L_1 \cdot \vec{x}_0$ ,  $\overrightarrow{DE} = L_2 \cdot \vec{x}_0$ ,  $\overrightarrow{EH} = d \cdot \vec{x}_0$  et  $\overrightarrow{HB} = -e \cdot \vec{z}_0$ , avec  $L_1 = 510 \text{ mm}$  ;  $L_2 = 510 \text{ mm}$  ;  $d = 80 \text{ mm}$  ;  $e = 60 \text{ mm}$  ;
- l'ensemble {4+5} constitue désormais une seule classe d'équivalence cinématique ;
- la masse de S<sub>0</sub> n'est pas prise en compte ;
- la masse de S<sub>2</sub> : m<sub>2</sub>=8 kg ;
- la masse de S<sub>3</sub> : m<sub>3</sub>=7 kg ;
- la masse de l'ensemble {4+5} : m<sub>4+5</sub> = m<sub>4</sub>+m<sub>5</sub> = 4+16 = 20 kg ;
- $\overrightarrow{OG_2} = b' \cdot \vec{x}_0$ ,  $\overrightarrow{DG_3} = c' \cdot \vec{x}_0$ ,  $\overrightarrow{HG_{4+5}} = -e' \cdot \vec{z}_0$  avec  $b' = c' = 380 \text{ mm}$ ,  $e' = 20 \text{ mm}$ .

**Question 17 Redessiner** le graphe des liaisons vu en question 7, en modifiant certaines liaisons (encastrement et axes) et en ajoutant les actions mécaniques extérieures à chacun des solides.

Les torseurs des actions mécaniques sont écrits de la façon suivante :

$$\begin{aligned} - \{T_{1 \rightarrow 2}\} &= \begin{Bmatrix} X_{12} & L_{12} \\ Y_{12} & M_{12} \\ Z_{12} & N_{12} \end{Bmatrix}_{C, R_0} \quad \text{dans l'espace,} \\ - \{T_{1 \rightarrow 2}\} &= \begin{Bmatrix} X_{12} & - \\ - & M_{12} \\ Z_{12} & - \end{Bmatrix}_{C, R_0} \quad \text{dans le plan } (\vec{x}_0, \vec{z}_0). \end{aligned}$$

**Question 18** En vue de calculer le couple de maintien C<sub>12</sub> au point O, **faire** le bilan des actions mécaniques extérieures à l'ensemble isolé {2, 3, 4+5}. **Exprimer** tous les torseurs au point O.

**Question 19** En appliquant le principe fondamental de la statique, **montrer** que le couple de maintien C<sub>12</sub> au point O, projeté sur l'axe  $\vec{y}_0$  est d'environ 350 N.m. **Préciser** le théorème utilisé et **détailler** la démarche utilisée.

**Question 20** En se référant à l'Annexe 2b, **comparer** la valeur de C<sub>12</sub> trouvée à la question précédente avec celle du couple maximal du moto-réducteur M1. **Conclure**.

**Question 21** À partir de la valeur de la vitesse angulaire du moto-réducteur M1 (Annexe 2b), **calculer** la puissance du moto-réducteur M1.

Dans cette configuration, le reste de l'ensemble de ce cobot consomme 400 W.

**Question 22** **Calculer** la puissance totale consommée dans cette configuration. **Comparer** cette valeur avec celle fournie dans la documentation constructeur (Annexe 2a). **Conclure**.

## PARTIE 4. Détection d'obstacle

*L'objectif est de vérifier que le cobot s'arrête lors d'un contact avec un obstacle.*

Chaque module est de conception identique et peut détecter la présence d'un obstacle en venant en contact avec ce dernier. Le cobot arrête ses mouvements, pour des raisons de sécurité.

Les éléments entrants dans cette chaîne de détection et présentés figure 16 sont notamment : le codeur absolu moteur, le moteur, le réducteur et le codeur absolu réducteur.

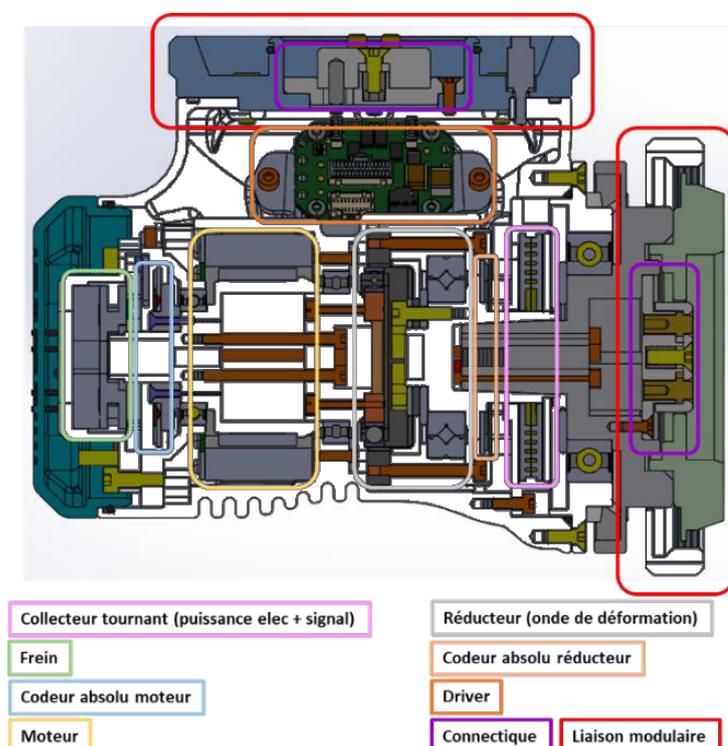


Figure 16 : constitution d'un module

### 4.1. Réducteur à ondes de déformation

*L'objectif est de valider la vitesse de rotation du motoréducteur.*

Un engrenage à onde de déformation, *strain wave gear* en anglais, est également appelé *harmonic drive* d'après le nom d'une société fabriquant de tels systèmes. C'est un type d'engrenage ayant des propriétés intéressantes par rapport aux engrenages traditionnels (tels les engrenages hélicoïdaux ou bien planétaires). En particulier, il présente :

- un jeu très réduit ;
- des rapports de transmission importants pour un mécanisme compact et très léger (jusqu'à 320:1 tandis que pour le même encombrement, un train épicycloïdal aurait un rapport de 10:1) ;
- un couple transmissible important ;
- des arbres d'entrée et de sortie coaxiaux.

Ce système a été conçu par Walton Musser en 1957. Il a été utilisé en particulier pour la motorisation des roues du rover lunaire et le déploiement des panneaux solaires de Skylab.

Le schéma figure 17 présente trois composantes du système :

- en bleu, une couronne extérieure, à denture intérieure, liée au bâti (le bâti n'est pas représenté) ;
- en rouge, une couronne déformable (flexible) à denture extérieure, liée à l'arbre de sortie (l'arbre de sortie n'est pas représenté) ;
- en vert, le générateur d'onde, de section elliptique, lié à l'arbre d'entrée (l'arbre d'entrée n'est pas représenté).

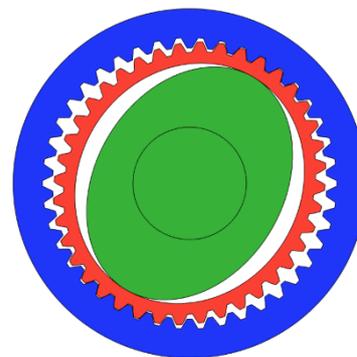


Figure 17 : composantes du système

Le générateur d'onde est entré « en force » dans la couronne flexible. Celle-ci est donc déformée, seules les dents à proximité du grand axe du générateur d'onde sont en prise avec la couronne extérieure.

Lorsque le générateur d'ondes se met en rotation, la couronne déformable étant en butée avec la couronne extérieure, elle n'est pas entraînée par le frottement du générateur d'onde. Cependant, l'orientation du grand axe du générateur d'onde tourne ; les dents de la couronne flexible en prise avec la couronne extérieure changent. Or, la couronne flexible a moins de dents que la couronne extérieure. La couronne flexible tourne donc en sens inverse du générateur d'onde.

Si par exemple la couronne flexible a deux dents de moins que la couronne extérieure, alors elle tourne de deux dents lorsque le générateur d'onde fait un tour. Le rapport de réduction  $r$  vaut donc :

$r = \frac{Z_f - Z_e}{Z_f}$ , avec :  $Z_f$  le nombre de dents de la couronne flexible et  $Z_e$  le nombre de dents de la couronne extérieure.

$\omega_{\text{sortie}} = 1,7 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $Z_f = 320$  dents et  $Z_e = 322$  dents

**Question 23** Calculer le rapport de réduction. Indiquer le sens de rotation de l'arbre d'entrée par rapport à celui de sortie.

**Question 24** Calculer la vitesse de rotation de l'arbre moteur (arbre d'entrée du réducteur), le résultat est à donner en  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$  puis en  $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$ .

**Question 25** À partir de cette valeur, conclure au regard des caractéristiques du moteur du module M2 (voir Annexes 3).

## 4.2. Les codeurs absolus

*L'objectif est de vérifier que les codeurs absolus répondent à l'exigence de précision angulaire.*

Un codeur absolu est un capteur de position angulaire qui permet de relever la position angulaire d'un module. Il fournit un signal numérique sur  $n$  bits et sa résolution est donc de  $2^n$  points par tour.

Le module comporte 2 codeurs magnétiques absolus identiques :

- le codeur  $C_1$  placé sur l'arbre moteur avant le réducteur ;
- le codeur  $C_2$  placé en sortie du réducteur.

**Question 26** Déterminer la résolution minimum (en bit) nécessaire pour le codeur  $C_2$  puis pour le codeur  $C_1$  pour obtenir la précision sur l'angle demandée par le cahier des charges (voir Annexe 1– Diagramme des exigences).

Les concepteurs du robot ont choisi d'utiliser des codeurs absolus 20 bits.

**Question 27 Préciser** lequel des 2 codeurs permet d'obtenir la meilleure précision sur la mesure d'angle en sortie du réducteur. **Donner** la valeur numérique de cette précision.

La transmission de la valeur mesurée de l'angle à la carte électronique se fait par une interface SSI (Synchronous Serial Interface). C'est un protocole série synchrone unidirectionnel point à point entre un maître et un esclave. La transmission se fait à l'aide de 2 paires de fils : l'une pour transmettre les signaux d'horloge (CLK), l'autre pour transmettre les données (DATA).

La figure 18 montre le déroulement de la transmission d'une position angulaire par le codeur absolu :

- au repos, les deux lignes CLK et DATA sont au niveau haut et le codeur (esclave) continue de mettre à jour sa position ;
- le maître lance un train d'impulsions d'horloge sur la ligne CLK (1) et le codeur gèle sa donnée de position ;
- au premier front montant sur la ligne CLK (2), le premier bit (MSB) est placé sur la ligne DATA puis chacun des bits du mot est transmis (1 bit par période d'horloge) en commençant par le bit le plus significatif (MSB) et en terminant par le bit le moins significatif (LSB) ;
- lorsque les 20 bits correspondant à la position angulaire sont transmis, un bit supplémentaire de parité (P) est transmis ;
- une fois ce dernier bit (P) transmis (3), un front montant supplémentaire d'horloge met la ligne CLK à l'état haut, la ligne DATA est alors placée à l'état bas pour une durée  $t_m$  puis retourne à l'état HAUT (4) ;
- une nouvelle transmission d'une autre position angulaire ne peut intervenir qu'après une durée de repos minimal  $T_p$  (comptée à partir du dernier front descendant de l'horloge).

Les caractéristiques temporelles de l'interface SSI utilisée par le système sont :

- fréquence de l'horloge CLK :  $f = \frac{1}{T} = 1\text{MHz}$  ;
- durée de repos minimal :  $T_p = 21\mu\text{s}$  ;
- délai d'attente :  $t_m = 20\mu\text{s}$ .

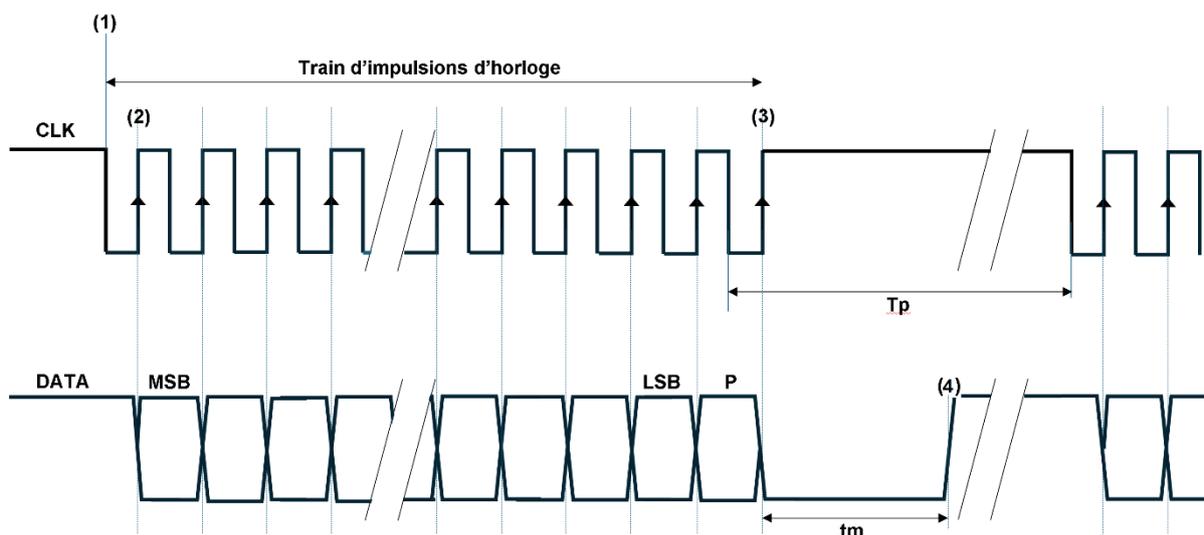


Figure 18 : transmission SSI d'une position angulaire par le codeur absolu

**Question 28 Calculer** la durée minimale  $T_{2\text{mini}}$  entre deux réceptions d'informations de position en fonction de  $f$  et  $T_p$ . **Donner** sa valeur numérique.

La vitesse de rotation maximale en sortie du réducteur est  $\omega_s = 1,7 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**Question 29** Pour la vitesse maximale de rotation, **déterminer** l'angle  $\Delta\theta$  parcouru en sortie du réducteur pendant cette durée  $T_{2\text{mini}}$ . Compte-tenu de la précision souhaitée, **indiquer** si la rapidité de la transmission est suffisante.

La durée choisie entre deux transferts d'information de la position angulaire est  $\Delta t = 200 \mu\text{s}$ . À partir des informations de positions angulaires fournies par le codeur  $C_1$  (en entrée du réducteur), il est nécessaire, pour le contrôle de la trajectoire, de déterminer la vitesse de rotation en sortie du réducteur. La vitesse angulaire à un instant est calculée en divisant la différence entre l'angle après et l'angle avant par la durée  $2\Delta t$ , soit  $\omega = \frac{\theta_{\text{après}} - \theta_{\text{avant}}}{2\Delta t}$ . La carte électronique reçoit les nombres  $N_{\text{avant}}$  et  $N_{\text{après}}$  correspondants respectivement aux angles  $\theta_{\text{après}}$  et  $\theta_{\text{avant}}$  mesurés par le codeur absolu  $C_1$  (20 bits de résolution).

**Question 30** Sur le document réponse DR2, **compléter** la fonction CalculVitesse qui prend en arguments les deux nombres  $N_{\text{avant}}$  et  $N_{\text{après}}$  et retourne la valeur de la vitesse angulaire en sortie du réducteur en degré par seconde.

**Question 31** À partir de la relation permettant de calculer la vitesse de rotation et de la précision sur la mesure d'angle calculée à la question 27, **estimer** la précision sur la vitesse angulaire en sortie du réducteur. **Conclure** par rapport au cahier des charges (voir Annexe 1 – Diagramme des exigences).

### 4.3. Détection d'obstacle

*L'objectif est de valider l'arrêt du cobot lors d'une détection d'obstacle.*

Afin d'assurer la sécurité des personnes, il est nécessaire de détecter si le cobot rencontre un obstacle pour, dans ce cas, arrêter le mouvement. La présence d'un obstacle provoque un effort supplémentaire pour le cobot et une augmentation du couple à fournir par le moteur.

**Question 32** **Indiquer** le paramètre électrique à surveiller pour détecter une augmentation du couple fourni par un moteur.

L'entreprise souhaite savoir s'il est aussi possible d'utiliser les angles mesurés par les codeurs absolus en entrée et en sortie du réducteur pour détecter la présence d'un contact et donc d'un obstacle. La figure 19 montre le résultat d'une étude théorique de résistance des matériaux qui a permis de tracer l'angle de torsion (en minutes d'arc) en fonction du couple (en N·m) pour les 3 modules du cobot Morfose.

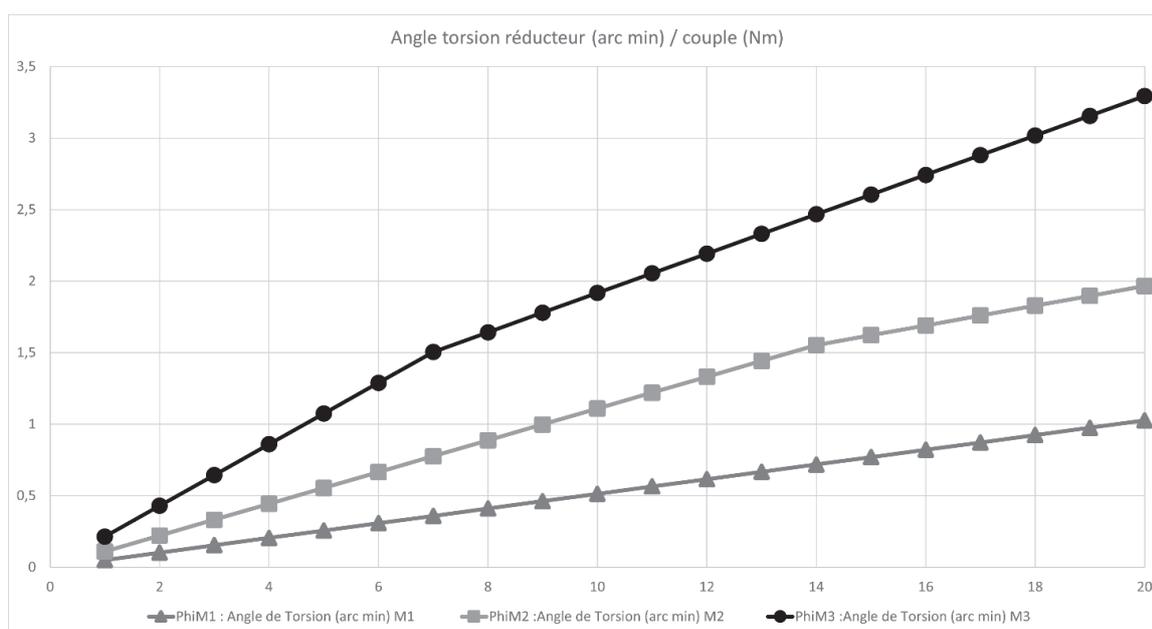


Figure 19 : résultat de l'étude théorique de torsion du réducteur

Rappel : un degré peut être divisé en 60 minutes. Une minute d'arc correspond donc à un soixantième de degré.

L'angle de torsion est donné par la relation :

$$\phi = \alpha_R - \alpha_M \cdot r \text{ avec } \begin{array}{l} \alpha_R : \text{position codeur côté sortie réducteur} \\ \alpha_M : \text{position codeur côté moteur} \\ r : \text{rapport de réduction (} r = 0,00625 \text{)} \end{array}$$

Une autre étude a montré que la détection d'un obstacle correspond à un couple de torsion minimum de 10 N·m.

**Question 33** Déterminer l'angle de torsion minimal à mesurer pour détecter un obstacle quel que soit le module. Donner sa valeur en degré.

**Question 34** En considérant que la torsion est uniquement due à une rotation côté moteur, c'est-à-dire une modification de l'angle  $\alpha_M$ , déterminer l'évolution de l'angle  $\alpha_M$  pour l'angle de torsion déterminé à la question précédente. Donner la valeur de l'angle  $\alpha_M$  en degré.

**Question 35** Conclure sur la possibilité de détecter un obstacle en utilisant la torsion de l'axe du réducteur.

## PARTIE 5. Contrôle en vitesse

*L'objectif est de contrôler que la peinture est déposée en couche uniforme.*

L'influence des actionneurs est primordiale pour le bon fonctionnement du cobot. Par conséquent, afin de maîtriser les mouvements, il est nécessaire de contrôler précisément les vitesses angulaires en régime permanent mais aussi en régime transitoire.

Les actionneurs associés à chaque axe du cobot sont du type moteur Brushless. L'étude d'asservissement est limitée au moteur M1.

Afin de maîtriser les accélérations angulaires et les vitesses angulaires générées par cet actionneur, deux boucles d'asservissement sont mises en place. Une boucle, dite interne, permet de contrôler le courant électrique circulant dans l'actionneur, puis une seconde boucle, dite externe, permet d'asservir la vitesse angulaire de rotation. La structure de l'asservissement est fournie sur la figure 20.

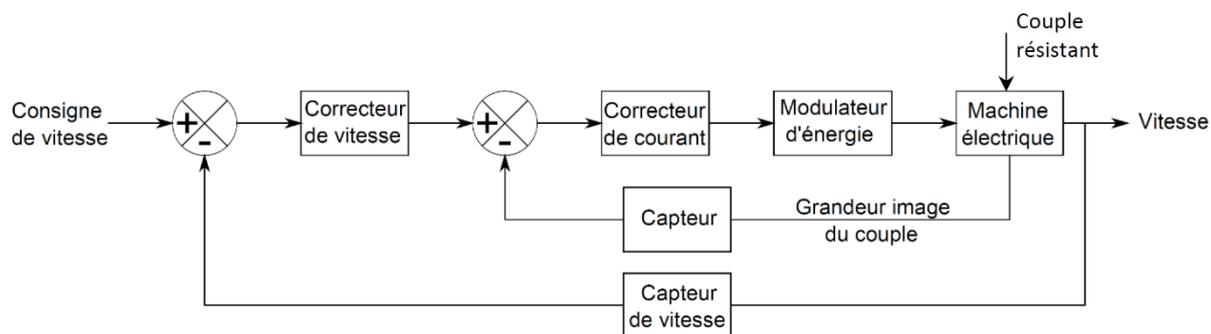


Figure 20 : schéma-bloc de l'asservissement en vitesse du moteur

La suite de l'étude est menée pour le contrôle de la vitesse angulaire de rotation de l'actionneur autour de l'axe  $(O, \vec{z}_0)$ .

## 5.1. Étude de la boucle de vitesse

*L'objectif est de valider la modélisation de l'asservissement de la boucle de vitesse.*

Une simulation du modèle asservi de cette boucle de vitesse est réalisée avec un logiciel de simulation. Le tracé de la vitesse de rotation en sortie du modèle simulé est présenté figure 21.

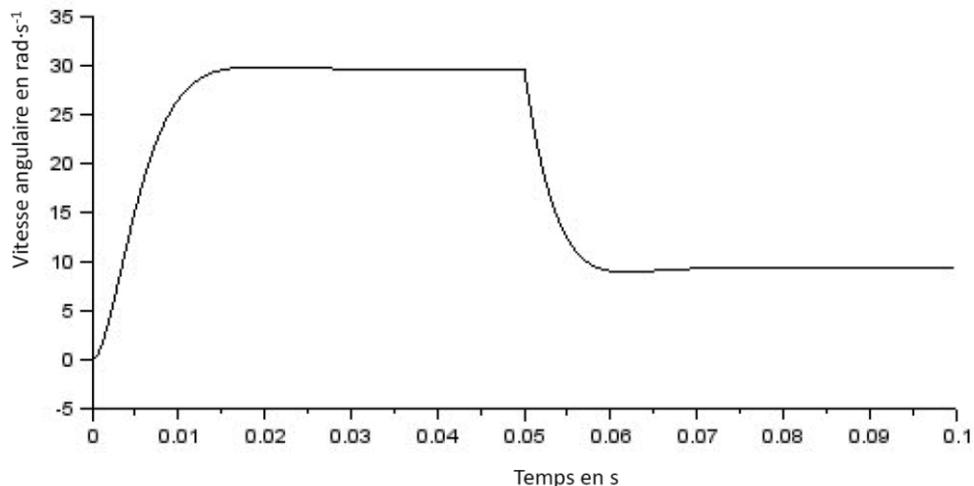


Figure 21 : courbe de la vitesse de rotation en sortie du modèle simulé

**Question 36** Décrire le phénomène se déroulant à l'instant  $t = 0,05$  s. Expliquer son origine en donnant un exemple.

Afin de tester les capacités du système à être précis et rapide (voir Annexe 1 – Diagramme des exigences), une nouvelle simulation est réalisée avec un échelon unitaire, envoyé sur l'entrée.

La courbe de sortie est relevée et donnée sur la figure 22.

Entrée :  $\omega_c(t) = 1 \cdot u(t) = 1 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$  avec  $u(t) = 1$  pour  $0 < t < +\infty$

Sortie :  $\omega(t)$ , vitesse de rotation du moteur en  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ .

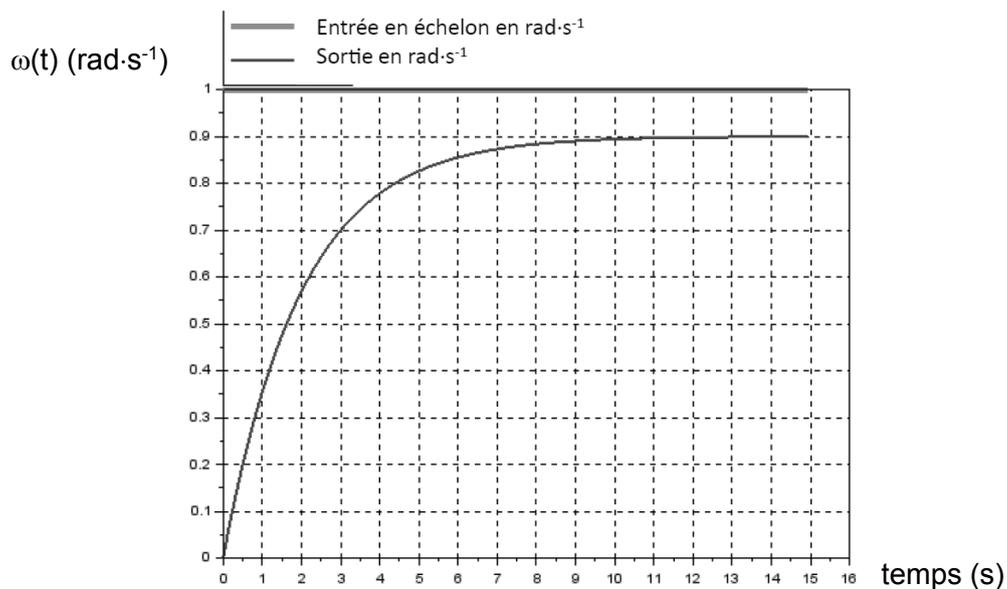


Figure 22 : courbe de la sortie du moteur,  $\omega(t)$

**Question 37** À partir du tracé figure 22, donner l'erreur statique absolue et relative. Conclure vis-à-vis du cahier des charges (voir Annexe 1 – Diagramme des exigences).

**Question 38** À partir du tracé figure 22, donner le temps de réponse à 5 %. Conclure vis-à-vis du cahier des charges (voir Annexe 1 – Diagramme des exigences).

**Question 39** Afin que le moteur réponde aux 2 critères précédents, **préciser** les éléments à modifier dans la boucle de vitesse du schéma-bloc de la figure 20.

## PARTIE 6. Peinture des portières

*L'objectif est de vérifier si les performances du robot permettent de respecter une cadence de production.*

Le cobot Morfose est utilisé pour peindre des portières de véhicules. La cadence minimale imposée est de 50 portières par heure. Pour simplifier le problème, les portières sont considérées comme des surfaces rectangulaires dont les dimensions sont données figure 23.

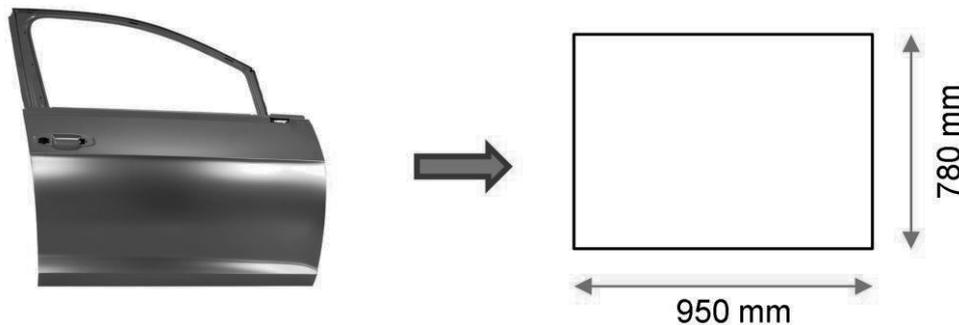


Figure 23 : modélisation de la portière par une surface rectangulaire

Le pistolet de peinture placé au bout du bras du robot permet de peindre une zone carrée dont le côté mesure 50 mm et dont le centre est le point A. Pour peindre la surface rectangulaire, le point A décrit une trajectoire qui débute en bas à gauche de la zone à peindre. Le début de cette trajectoire est représenté figure 24.

La position du point A est repérée par ses coordonnées  $(x_A, y_A)$ . L'origine du repère est située au point O, à l'angle en bas à gauche de la zone rectangulaire à peindre. Au début les coordonnées du point A sont  $x_A = 25$  mm et  $y_A = 25$  mm.

La vitesse de déplacement du point A est de  $0,45$  m·s<sup>-1</sup> suivant l'axe x et la même suivant l'axe y.

La durée nécessaire pour évacuer une portière peinte et placer une nouvelle portière à peindre en position est notée  $D_C = 5$  s. Le retour à la position d'origine du pistolet se fait en même temps que l'évacuation de la portière peinte et en un temps plus court que la durée  $D_C$ .

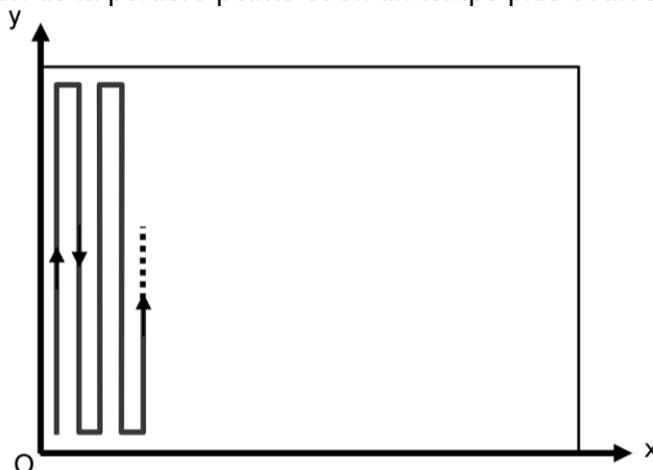


Figure 24 : début de la trajectoire du point A (centre de la zone carrée)

Le cycle complet de la peinture d'une portière comprend la peinture de la zone rectangulaire, évacuation de la portière peinte et la mise en place d'une nouvelle portière à peindre.

- Question 40** **Déterminer** la durée nécessaire  $D_1$  pour le premier déplacement de bas en haut puis la durée  $D_2$  nécessaire pour le premier déplacement de gauche à droite.
- Question 41** **Compléter** les transitions manquantes (en pointillés) au niveau du diagramme états-transitions du document réponse DR3 qui représente le déplacement du pistolet pour peindre totalement la zone rectangulaire (le diagramme ne prend pas en compte le retour à la position d'origine).
- Question 42** **Déterminer** la durée nécessaire  $D$  pour effectuer un cycle.
- Question 43** Sachant que l'évacuation de la portière peinte et le retour à la position d'origine peuvent s'effectuer en parallèle, **déterminer** la cadence maximale possible en nombre de portières peintes par heure. **Comparer** à la cadence minimale imposée et **conclure**.

## **PARTIE 7. Conclusion**

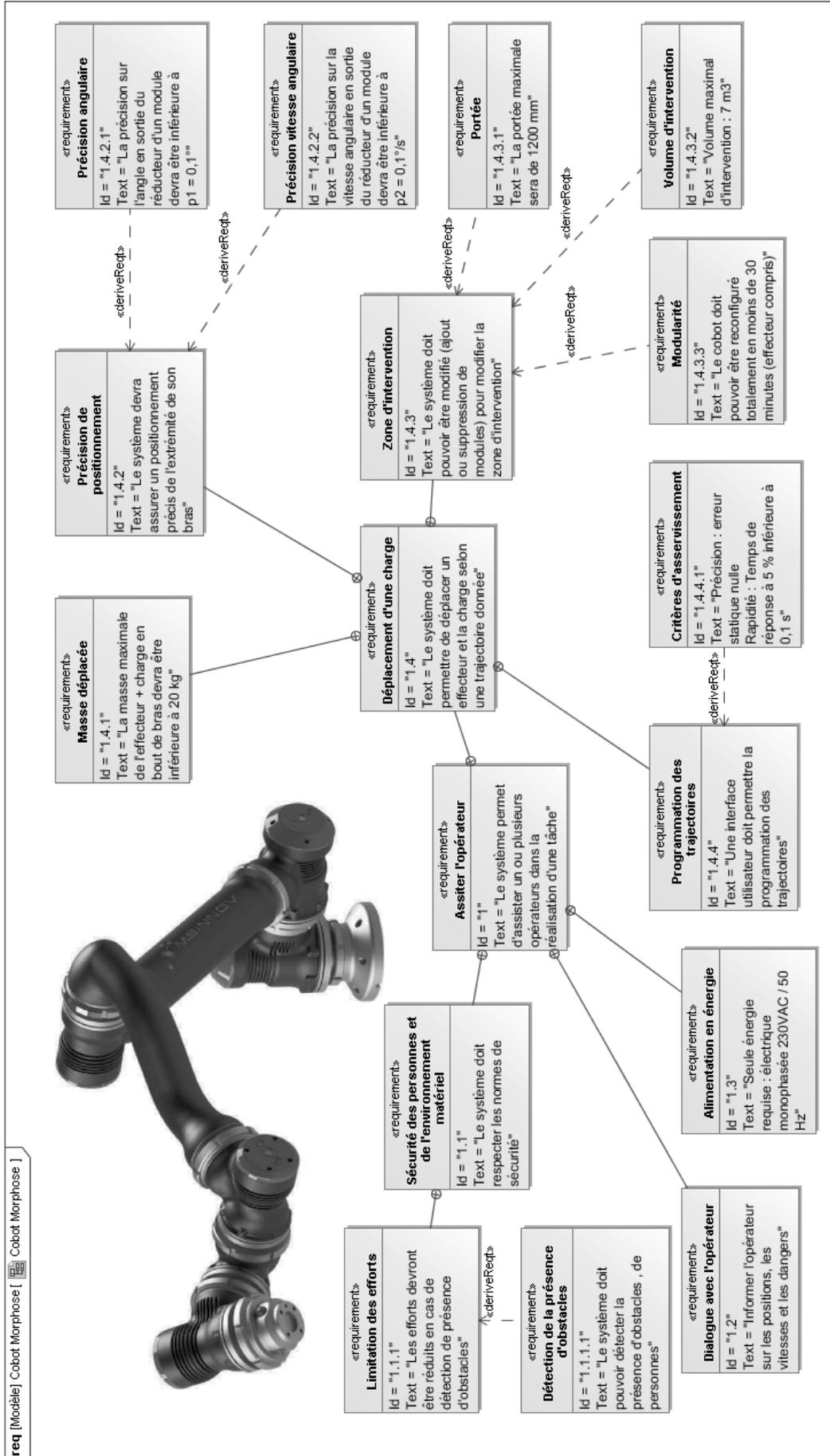
Les cobots ne sont pas intelligents, leurs capacités sont limitées. Ils suivent un programme, comme le diagramme états-transitions vu en question 43 et sont équipés de différents capteurs pour détecter la présence d'obstacles.

Il est légitime de se demander si le robot collaboratif peut devenir un robot cognitif et peut déterminer par lui-même s'il y a une surépaisseur lors de travaux de peinture.

- Question 44** **Préciser** ce qu'il manque à ce cobot pour qu'il devienne un robot cognitif et intelligent, c'est-à-dire pour qu'il puisse apprendre, percevoir, résoudre des problèmes et prendre des décisions sans intervention humaine.

**Fin du questionnaire.**

# Annexe 1 - Diagramme des exigences



# Cobot Généralités

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Nombres d'axes                     | jusqu'à 7 articulations pivotantes  |
| Charge utile                       | jusqu'à 20 kg   |
| Portée                             | jusqu'à 1200 mm   |
| Programmation                      | interface utilisateur graphique   écran tactile 10"   boutons physiques pour mouvements |
| Montage du cobot                   | dans toutes les directions  |
| Emprise de montage                 | diam < 200 mm   |
| Matériaux                          | Aluminium, acier  |
| Longueur du câble du bras robotisé | 5 m (modifiable sur CDC)  |
| Poids avec câble                   | < 40 kg   |

## Liaisons modulaires

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| Temps de reconfiguration | 10 minutes |
|--------------------------|------------|

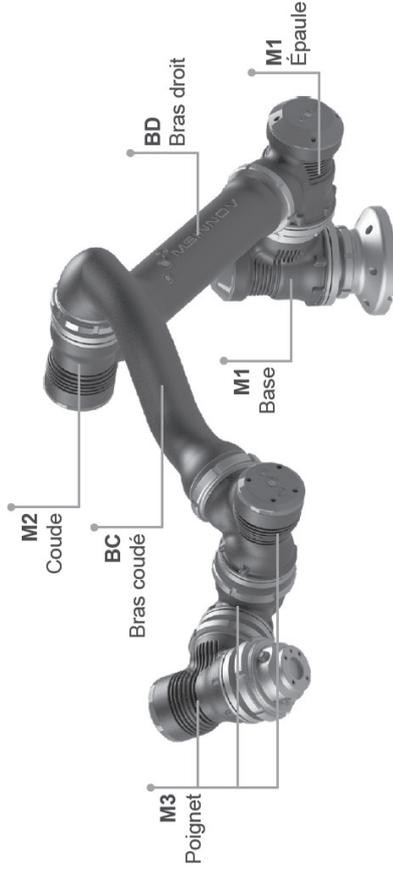
## Performances

|  |   |
|--|---|
| Consommation max en utilisation standard     | < 1500 W  |
| Consommation moyenne en utilisation standard | < 900 W   |
| Opération de collaboration                   | Free drive   détection contact   paramétrage vitesse   zones de limitations |

## Environnement

|                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| Classification IP       | IP54            |
| Bruit                   | < 65 dB(A)      |
| Outils                  |                 |
| Entrées numériques E/S  | 2               |
| Sorties numériques E/S  | 2               |
| Entrées analogiques E/S | 2               |
| Alimentation E/S        | 12/24 V   2/1 A |

# MORFOSE Données techniques



**Temps de reconfiguration**  
10 min



**Charge utile**  
jusqu'à 20 kg



**Portée**  
jusqu'à 1200 mm



**Communication**  
avec tous les environnements industriels



**Angle de balayage**  
infini



**Opérations de collaboration**  
Free drive, détection contact ...

## Annexe 2b - Document technique du cobot Morfose

|   |                            |
|---|----------------------------|
| Type de connecteurs d'outil (effecteur) | M8                         |
| Plage de température ambiante           | 0-50 °C                    |
| Humidité                                | 90% HR (sans condensation) |

### Mouvement

|   |            |
|---|------------|
| Répétabilité de position selon ISO 9283 | +/- 0,1 mm |
| Vitesse nominale du TCP (PCO)           | 1 m/s      |

### Modules

| Modules | Couple nominal (Nm) | Couple max (Nm) | L (mm) | Poids (kg) | Vitesse module (°/s) | Plage de mouvement (°) |
|---------|---------------------|-----------------|--------|------------|----------------------|------------------------|
| M1      | 271                 | 621             | 120    | 7          | 101,25               | ∞                      |
| M2      | 149                 | 402             | 100    | 4,5        | 105                  | ∞                      |
| M3      | 81                  | 225             | 80     | 3,5        | 72                   | ∞                      |
| BD1200  | NA                  | -               | 360    | 2,5        | -                    | -                      |
| BD900   | NA                  | -               | 210    | 2          | -                    | -                      |
| BC1200  | NA                  | -               | 380    | 3          | -                    | -                      |
| BC900   | NA                  | -               | 230    | 2,5        | -                    | -                      |

### Boîtier de commande

|                               |                |
|-------------------------------|----------------|
| Classification IP             | IP54           |
| Plage de température ambiante | 0-50 °C        |
| Ports E/S                     |                |
| Entrées numériques            | 16             |
| Sorties numériques            | 16             |
| Entrées analogiques           | 2              |
| Sorties analogiques           | 2              |
| Entrées numériques sécurité   | 4              |
| Sorties numériques sécurité   | 4              |
| Alimentation E/S              | 24 V 2 A       |
| Taille (LxHxP)                | 450x280x280 mm |
| Poids                         | < 22 kg        |

|                     |  |
|---------------------|--|
| Matériaux           | Acier peinture poudre  |
| Communication       | Modbus TCP   ETHERNET IP  <br>USB 2.0   USB 3.0   PROFINET  <br>CANopen   EtherCAT   + sur CDC |
| Source alimentation | 200-240 VAC / 47-63 Hz   |
| Humidité            | 90%HR (sans condensation)  |

### Pendant de programmation

|                           |                         |
|---------------------------|-------------------------|
| Classification IP         | IP54                    |
| Humidité                  | 90%HR                   |
| Résolution affichage      | 1280 x 800 pixels       |
| Matériaux                 | Plastique               |
| Poids avec 5m de câble TP | < 2 kg                  |
| Longueur câble            | 5m (modifiable sur CDC) |

1A rue Jacqueline Auriol, 90 000 BELFORT  
03 39 03 41 60  
morfose@ms-innov.fr  
www.ms-innov.fr



### Annexe 3 - Caractéristiques de modules

| CARACTERISTIQUES DES MODULES |                     |                 |        |            |                      |                      |           |                            |                        |                        |                           |                  |           |                           |                              |
|------------------------------|---------------------|-----------------|--------|------------|----------------------|----------------------|-----------|----------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|------------------|-----------|---------------------------|------------------------------|
| Modules                      |                     |                 |        |            |                      |                      | Moteurs   |                            |                        |                        |                           |                  |           | Réducteurs                |                              |
| Modules                      | Couple nominal (Nm) | Couple max (Nm) | L (mm) | Poids (kg) | Vitesse module (°/s) | Référence            | Kt (Nm/A) | Couple nominal moteur (Nm) | Couple max moteur (Nm) | Vitesse nominale (rpm) | Rendement moteur 60°C (%) | Référence2       | Réduction | Couple max répétable (Nm) | Rendement réducteur 40°C (%) |
| M1                           | 271                 | 621             | 120    | 7          | 101,25               | TBM2G-9426D-ANAA-00  | 0,16      | 3,67                       | 8,4                    | 2700                   | 67%                       | CSD-32-160-2A_GR | 160       | 261                       | 69%                          |
| M2                           | 149                 | 402             | 100    | 4,5        | 105                  | TBM2G-08513C-ANAA-00 | 0,14      | 1,65                       | 4,44                   | 2800                   | 82%                       | CSD-25-160-2A_GR | 160       | 123                       | 69%                          |
| M3                           | 81                  | 225             | 80     | 3,5        | 72                   | TBM2G-07613A-ANAA-00 | 0,28      | 1,23                       | 3,43                   | 1200                   | 84%                       | CSD-20-100-2A_R  | 100       | 57                        | 78%                          |
| BD1200                       | NA                  |                 | 360    | 2,5        |                      |                      |           |                            |                        |                        |                           |                  |           |                           |                              |
| BC1200                       | NA                  |                 | 380    | 3          |                      |                      |           |                            |                        |                        |                           |                  |           |                           |                              |
| BD900                        | NA                  |                 | 210    | 2          |                      |                      |           |                            |                        |                        |                           |                  |           |                           |                              |
| BC900                        | NA                  |                 | 230    | 2,5        |                      |                      |           |                            |                        |                        |                           |                  |           |                           |                              |
| M0                           | 475                 | 0               | 140    | 8          |                      |                      |           |                            |                        |                        |                           |                  |           |                           |                              |
| M4                           | 25                  | 0               | 60     | 3          |                      |                      |           |                            |                        |                        |                           |                  |           |                           |                              |
| BD1500                       | NA                  |                 | 510    | 3          |                      |                      |           |                            |                        |                        |                           |                  |           |                           |                              |
| BC1500                       | NA                  |                 | 530    | 3,5        |                      |                      |           |                            |                        |                        |                           |                  |           |                           |                              |

## Document réponse DR1 (question 16)

Programme Python : tracé du modèle linéarisé

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

L=510 # en mm
d=80 # en mm
beta=np.arange(0,90,5) # angle beta de 0 à 85 degrés avec un pas de 5 degrés
X=L*(np.cos(beta/180*np.pi)+np.cos(beta/2/180*np.pi))+d # Distance X en mm
plt.plot(beta,X,"o-b") # tracé de la distance X en fonction de l'angle béta

beta_pour_droite=[30,85]

X_linearise= ..... # A COMPLETER

plt.plot(beta_pour_droite,X_linearise,"r",linewidth=2)

plt.grid()
plt.axis([0,90,0,1200])
plt.xlabel("Béta en degrés")
plt.ylabel("X en mm")
plt.show()
```

## Document réponse DR2 (question 30)

Calcul de la vitesse angulaire à partir des valeurs mesurées par le codeur magnétique absolu C<sub>1</sub>.

```
def CalculVitesse(Navant,Napres):
    r=6.25e-3
    Delta_t=200e-6

    Angle_avant = .....

    Angle_apres = .....

    Vitesse_sortie_reducteur = .....

    return Vitesse_sortie_reducteur
```



## Document réponse DR3 (question 41)

Diagramme états-transitions représentant le déplacement du pistolet pour peindre la zone rectangulaire modélisant la portière (le diagramme ne prend pas en compte le retour à la position d'origine).

