

1 DM du ski : synthèse 1er semestre

Devoir 1- Robot de dépose de joint
Mines AADN 2006

Corrigé page 15

A. Présentation générale

A.1. Mise en situation

La société John Deere conçoit et fabrique du matériel agricole. L'usine, située dans le Loiret, est chargée de la fabrication et du montage des moteurs Diesel de 3, 4, ou 6 cylindres. Les photos (voir figure 1) montrent la chaîne d'assemblage des moteurs, ceux-ci étant maintenus sur des balancelles.

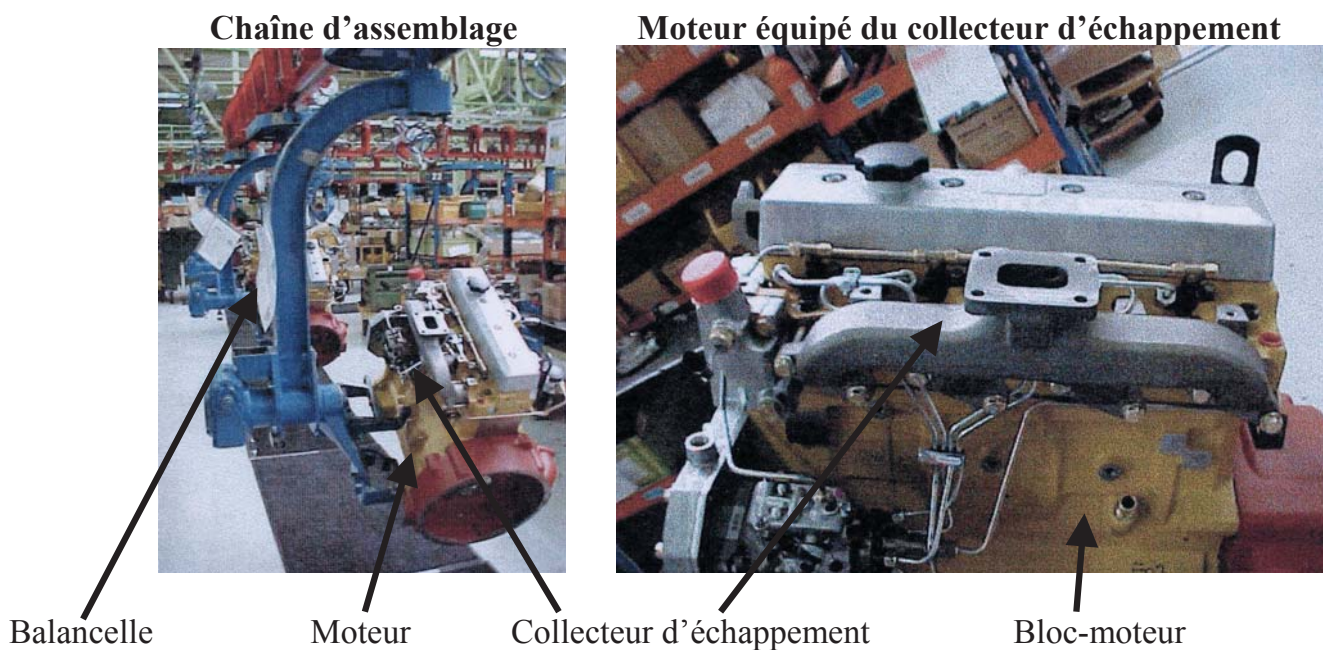


Figure 1 – Chaîne d'assemblage des moteurs

La pièce qui a pour fonction principale de collecter les gaz d'échappement issus des cylindres pour les envoyer vers le pot d'échappement s'appelle le collecteur d'échappement.

Le sujet a pour thème l'étude du poste de dépose du joint liquide sur le collecteur d'échappement du moteur.

A.2. Machine de dépose de joint liquide

Initialement, l'étanchéité aux gaz d'échappement entre le moteur et le collecteur d'échappement était réalisée par des joints métalliques. Leur mise en place était compliquée, l'étanchéité n'était pas optimale.

C'est pourquoi, après plusieurs essais, la société John Deere a souhaité appliquer un nouveau procédé d'étanchéité réalisé par la dépose d'un joint liquide effectué sur une machine de dépose automatisée.

Ces joints sont 10 fois moins onéreux, sont plus efficaces, et nécessitent une moins bonne qualité de surface des zones de contact entre moteur et collecteur (figure 2).

A.3. Fonctionnement du poste de dépose de joint liquide

1. L'opérateur prend le collecteur (3, 4, ou 6 cylindres) correspondant au moteur arrivé au poste (l'ordre d'arrivée des collecteurs dépend de la production en amont du poste et de la demande). La masse du collecteur pouvant aller jusque $m_c = 18 \text{ kg}$ un manipulateur mécanique assiste l'opérateur (figure ??).



Figure 2 – Collecteur avec son joint d'étanchéité

Il positionne le collecteur d'échappement sur le poste de travail grâce à deux piges¹ placées dans deux orifices de chaque côté du collecteur. La figure 3 précise la localisation des piges en fonction du type de collecteur (3,4 ou 6 cylindres). Le collecteur est maintenu en position par un mécanisme de serrage.

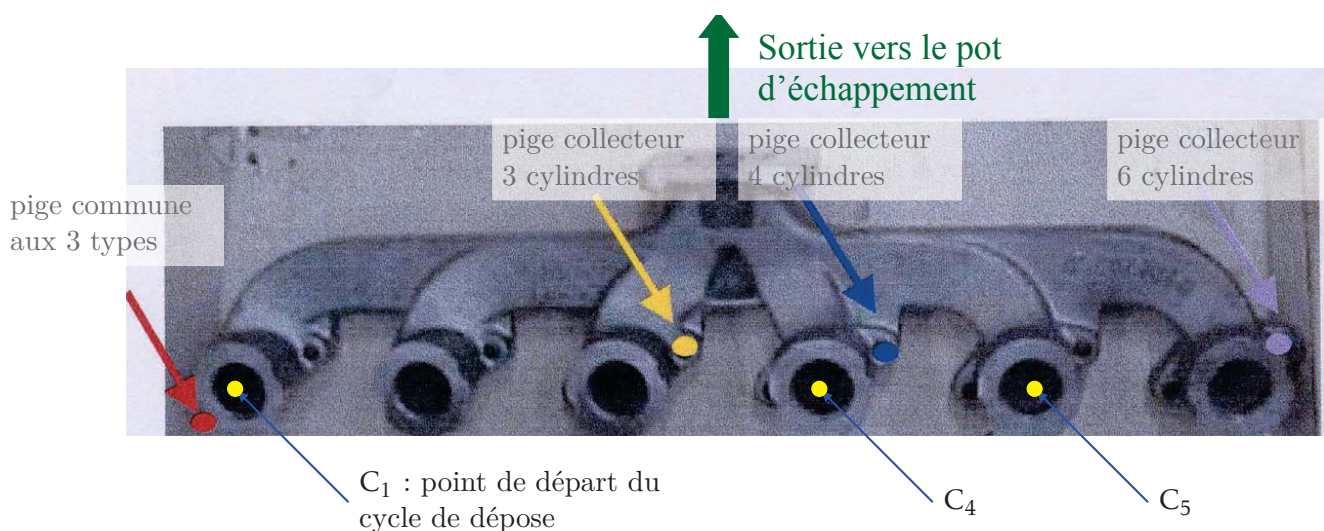


Figure 3 – Collecteur d'échappement (ici, 6 cylindres)

2. Un fois le collecteur en place, l'opérateur fait pivoter manuellement la table pour placer le collecteur sous le robot. La table est immobilisée dans cette position pendant tout le cycle automatique de dépose de joint. Un vérin d'indexage assure l'immobilisation de la table. Les figures 4 et 5 décrivent l'environnement de travail de l'opérateur.

Lorsque le collecteur est en place, l'opérateur autorise le départ du cycle de dépose en appuyant sur le bouton dcy du pupitre. Pendant la réalisation du joint, l'opérateur démonte le collecteur réalisé précédemment et installe le suivant.

3. Le cycle de dépose de joint liquide commence dès que l'opérateur appui sur le bouton dcy, et que les conditions de fonctionnement en sécurité sont remplies (la présence du collecteur est détectée par un capteur photo-électrique, et que la table est bloquée en position).

Alors l'automate programmable² gère ce cycle et commande le robot 6 axes.

4. Au début du fonctionnement, le robot est en position origine (C_0) il se déplace vers le centre du premier orifice d'échappement du collecteur (figure 3). On note ce point C_1 , il est identique pour tous les types de collecteurs et t_1 cette première trajectoire

Le déplacement du point C_0 au point C_1 (trajectoire t_1) est généré par la fonction *AtteindrePoint(P)* de

1. une pige est un cylindre métallique utilisé pour la mise en position

2. un automate programmable est un calculateur dédié à la commande des processus industriels

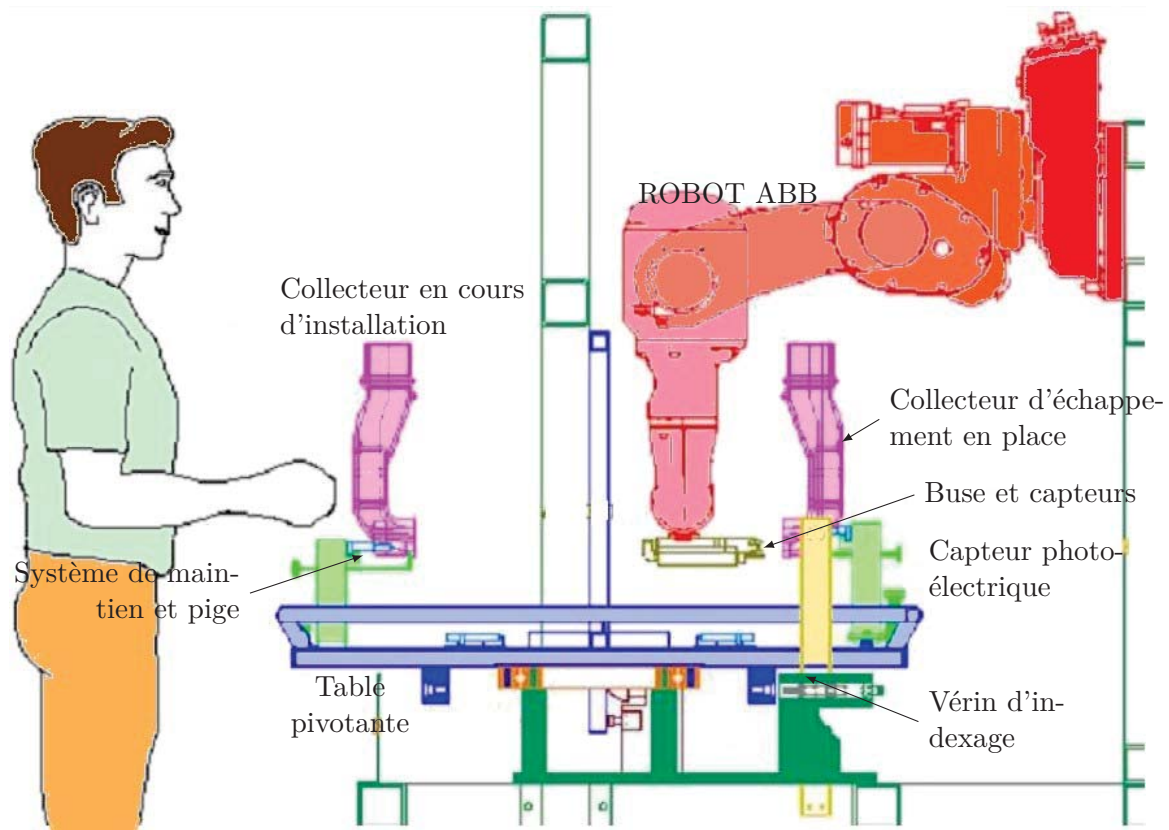


Figure 4 – Poste de travail

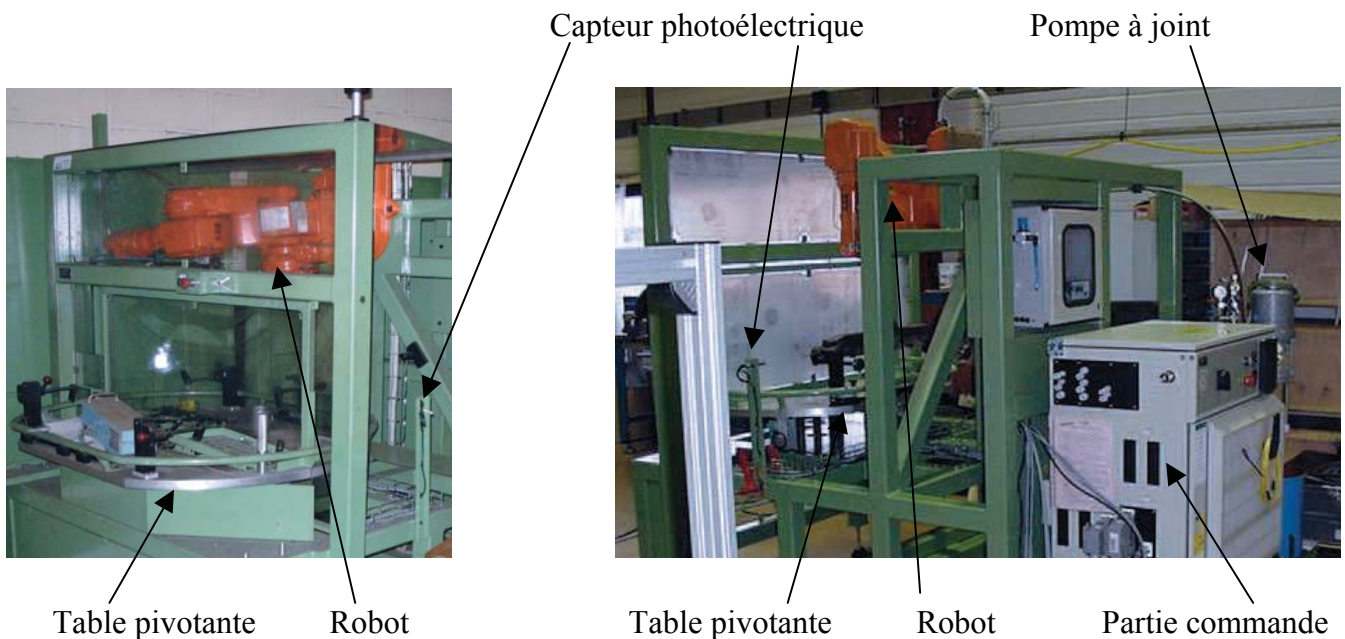


Figure 5 – Mise en situation

l'automate programmable où P_x , P_y , P_z sont les coordonnées du point P à atteindre. Ici la fonction sera appelée avec les coordonnées du point C_1 : *AtteindrePoint*(C_1).

Sur la figure 7), ce déplacement est représenté par la trajectoire t_1 , perpendiculaire au plan de la feuille.

À la fin de ce déplacement, la buse se trouve au centre du premier orifice d'échappement. Sur la tête du robot, à proximité de la buse, se trouve deux capteurs, un capteur de présence de métal et un capteur de distance (figure 6). Le premier capteur détecte la présence effective du métal du collecteur, le deuxième mesure précisément la distance entre la buse et le collecteur.

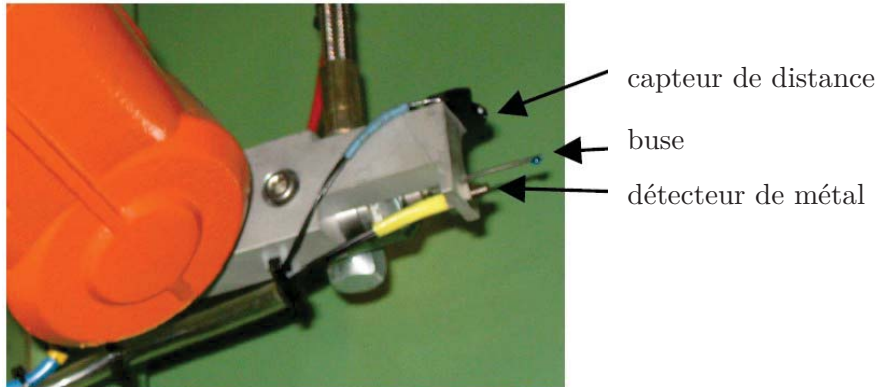


Figure 6 – Tête du robot avec buse et capteurs

La fonction *DetecterMetal* retourne une information booléenne (Vrai/Faux), si la fonction retourne vrai, alors le cycle peut continuer sinon, le robot retourne à sa position d'origine (*AtteindrePoint(C₀)*).

- La présence de métal étant confirmé, l'extrémité du robot se dirige vers le premier point de la trajectoire de dépose de joint à décrire (*AtteindrePoint(D₁)*), avec D_1 le premier point de la trajectoire autour du premier orifice. On note t_2 la trajectoire de C_1 à D_1

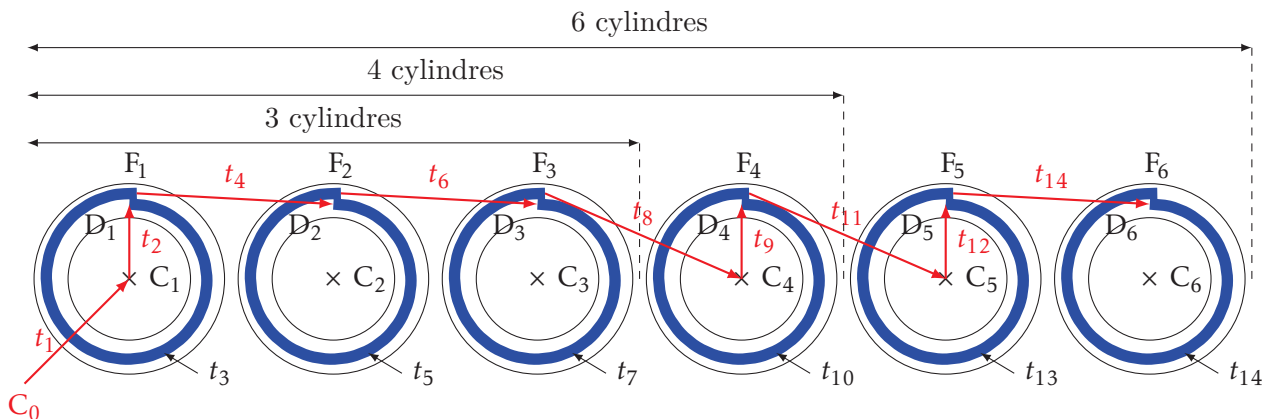


Figure 7 – Déplacements et trajectoires

- À partir du point D_1 le robot exécute la trajectoire quasi circulaire qui assure la dépose du joint tout autour de l'orifice. Cette trajectoire (t_3) est générée par la fonction *DeposerJoint* de l'automate. Pendant ce déplacement le capteur de distance mesure en continu l'écart entre la buse et le collecteur, la mesure de cet écart permet de corriger la consigne de déplacement utilisée par l'asservissement de position du robot. Pour que le joint soit correct, la distance entre la surface de dépose et la buse doit être de $1 \pm 0,1 \text{ mm}$. On note F_1 le point de fin de la trajectoire.
- Le robot déplace ensuite la buse vers le point de début du deuxième orifice D_2 et exécute de nouveau la dépose du joint. Le cycle recommence pour le troisième orifice.
- À la fin de ce cycle, le robot se déplace au dessus du point de centre du quatrième orifice, C_4 (*AtteindrePoint(C₄)*) (figure 3). Si La fonction *DetecterMetal* retourne Vrai, alors le robot exécute un nouveau cycle de dépose pour ce quatrième orifice, sinon, il retourne à la position origine (*AtteindrePoint(C₀)*).
- À la fin de ce cycle, il se déplace au dessus du point de centre du cinquième orifice C_5 , si le collecteur est un collecteur d'un moteur 6 cylindres, il exécute le cycle de dépose pour les deux derniers orifices, dans le cas contraire, il retourne à la position origine.
- Le dernier déplacement, est le retour en position origine.
- L'opérateur peut alors évacuer le collecteur et placer le suivant.

A.4. Exigences

Les principales exigences du poste de dépose de joints sont décrites dans le diagramme de la figure 14.

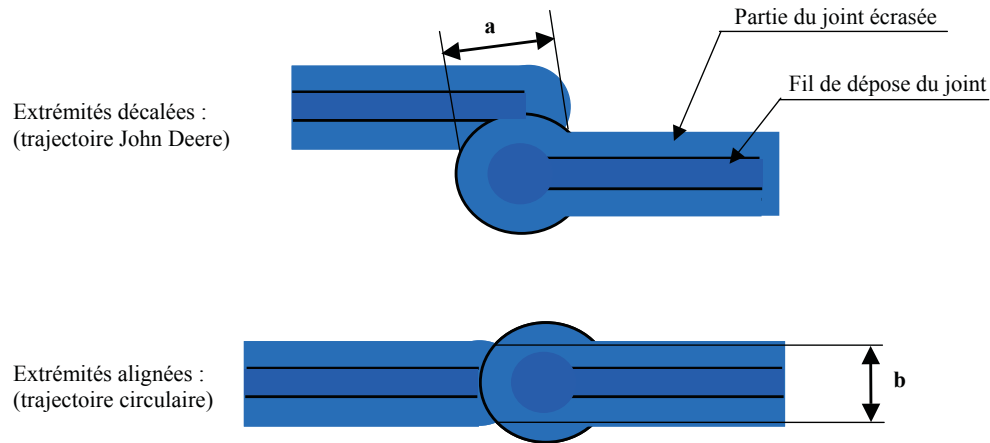


Figure 8 – Détails de l'extrémité du joint

A.5. Constituants

La figure 15 présente les différents constituants du système.

B. Analyse fonctionnelle

Q1. À partir de la description du fonctionnement, du diagramme d'exigences et du diagramme de définition de blocs, préciser quels sont les constituants qui participent à la réalisation des exigences. Répondre dans le tableau du document réponse.

Q2. La forme du joint n'est pas parfaitement circulaire (figures 8 et 7). Comparer la distance « b » d'une forme circulaire de joint et la distance « a » d'une forme de joint adoptée par John Deere, et comparer les zones de recouvrement du joint : Pour quelle(s) raison(s) donne-t-on au joint cette forme là ? Donner au moins une raison.

Le cycle de dépôt pour les collecteurs trois cylindres peut être décrit par l'algorithme 2 incomplet page 15 du document.

Q3. Compléter l'algorithme afin de décrire la procédure complète de dépôt de joint sur un collecteur de 3, 4 ou 6 cylindres.

Q4. Proposer une description du cycle à partir d'une machine à états (Diagramme états -transitions / state machine diagram).

C. Étude cinématique et géométrique du robot ABB

Le robot ABB dont le bras supporte la buse de dépôt de joint liquide est représenté sur la figure 13 en 2 vues : vue de face et vue de dessus.

Dans ces 2 vues, on a représenté le robot avec : $\theta_{01} = \theta_{34} = \theta_{45} = \theta_{56} = 0$ et $\theta_{12} = -\theta_{23}$

Q5. : Effectuer le graphe des liaisons du robot ABB de la pièce 0 à 6.

Q5a. Préciser pour chaque liaison le torseur cinématique dans la base canonique de la liaison.

Q5b. Préciser pourquoi on nomme un tel robot, un robot 6 axes.

Q6. La figure ?? page ?? du document réponse présente une épure 3D des points et axes du robot ABB. Représenter sur cette épure, le schéma cinématique 3D du robot.

On présente figure 9 le robot en position « parking » : $\theta_{01} = -90^\circ$, $\theta_{12} = 14^\circ$ et $\theta_{23} = -14^\circ$.

Q7. Par quel mouvement, le robot passe-t-il de la position de parking à la position schématisée par la figure 13.

Détermination du premier point de la trajectoire 1

On se propose de déterminer les coordonnées du premier point de la trajectoire de l'extrémité de la buse M dans $R_0 = (O_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$, au début du mouvement de translation défini lors de la trajectoire 1. C'est le premier point que le point M, extrémité de la buse, devra rejoindre au début du programme de dépôt de joint liquide. Le schéma cinématique donné sur la figure 13 a été effectué pour : $\theta_{01} = \theta_{34} = \theta_{45} = \theta_{56} = 0$ et $\theta_{12} = -\theta_{23}$. On donne le paramétrage et les figures de calculs (figure 10) :

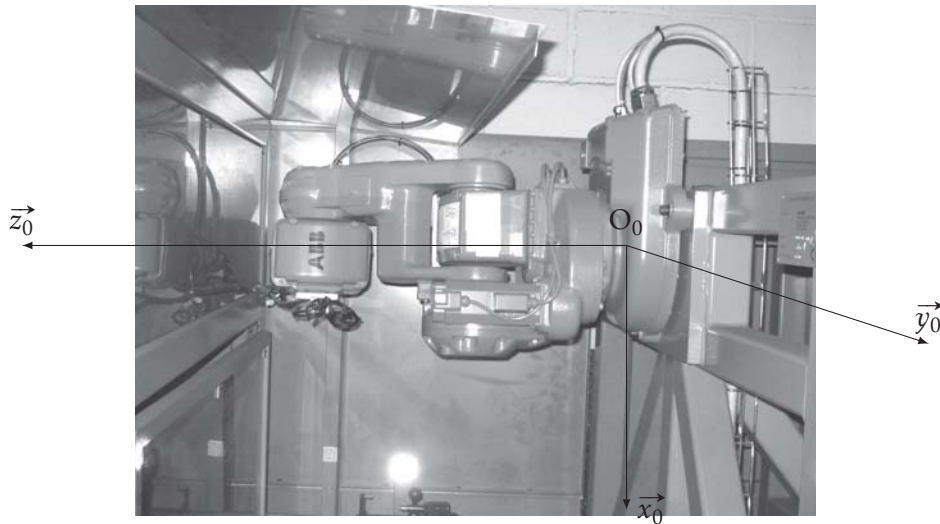


Figure 9 – Robot en position parking

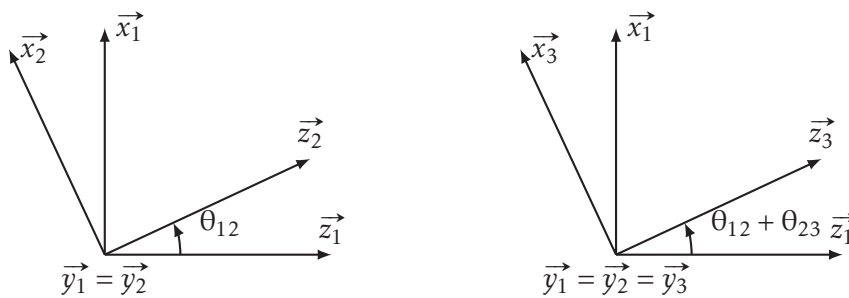


Figure 10 – figures de calculs

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{O_0O_1} &= a \cdot \vec{x}_1 + b \cdot \vec{z}_0 - f \cdot \vec{y}_1, & \overrightarrow{O_3O_4} &= e \cdot \vec{x}_3 + h \cdot \vec{y}_4, & \theta_{01} &= (\vec{x}_0, \vec{x}_1), & \theta_{34} &= (\vec{y}_3, \vec{y}_4), \\
 \overrightarrow{O_1O_2} &= c \cdot \vec{z}_2, & \overrightarrow{O_4O_5} &= g \cdot \vec{x}_5, & \theta_{12} &= (\vec{x}_1, \vec{x}_2), & \theta_{45} &= (\vec{z}_4, \vec{z}_5), \\
 \overrightarrow{O_2O_3} &= d \cdot \vec{x}_3 + f \cdot \vec{y}_3, & \overrightarrow{O_5M} &= -h \cdot \vec{y}_6 - l \cdot \vec{z}_6, & \theta_{23} &= (\vec{x}_2, \vec{x}_3), & \theta_{56} &= (\vec{y}_5, \vec{y}_6).
 \end{aligned}$$

Dans la position particulière du premier point de la trajectoire 1 de la buse, on a les angles suivants : $\theta_{01} = \theta_{34} = \theta_{45} = \theta_{56} = 0$ et toujours $\theta_{12} = -\theta_{23}$.

Q8.

Q8a. Déterminer pour la position particulière définie ci-dessus, en fonction du paramétrage donné, les vecteurs suivants :

- $\overrightarrow{O_0O_1}$ en projection sur les axes $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$
- $\overrightarrow{O_2O_3}$ en projection sur les axes (\vec{x}_3, \vec{y}_0)
- $\overrightarrow{O_3O_4}$ en projection sur les axes (\vec{x}_3, \vec{y}_0)
- $\overrightarrow{O_4O_5}$ en projection sur les axes (\vec{x}_3)
- $\overrightarrow{O_5M}$ en projection sur les axes (\vec{y}_0, \vec{z}_3)

Q8b. Déterminer pour la position particulière définie ci-dessus, en fonction du paramétrage donné, le vecteur $\overrightarrow{O_0M}$ en projection sur les axes $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$.

C.2. Validation des trajectoires

Nous n'allons pas ici, étudier complètement la cinématique du robot ABB, mais juste valider ou non sa capacité à réaliser les trajectoires nécessaires pour obtenir une dépose correcte du joint sur la culasse. Les trajectoires sont représentées dans le repère du robot sur la figure 11.

Afin de simplifier l'étude, nous supposons que les trois segments sont parallèles aux axes du repères et que la trajectoire de dépose est un cercle de centre C_1 et de rayon R_1 .

On se propose de valider dans un premier temps les deux trajectoires linéaires : C_0C_1 et C_1D_1 et montrer et qu'il suffit de piloter les liaisons pivots en O_1 , O_2 et O_4 pour obtenir ces trajectoires.

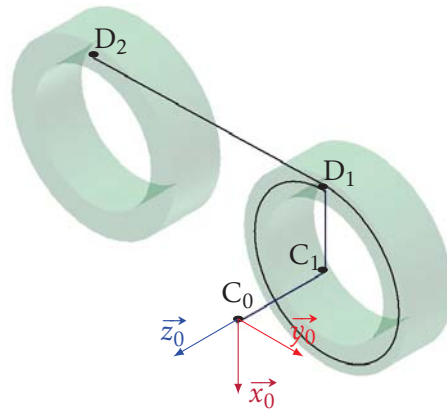


Figure 11 – Trajectoires en 3D dans le repère associé à la base du robot

Pour cela, nous allons utiliser un schéma cinématique simplifié avec uniquement ces liaisons, les solides entre ces liaisons étant bloqués. La figure 12 présente le modèle simplifié pour les deux trajectoires à valider. Le point noté M représente la buse de dépose.

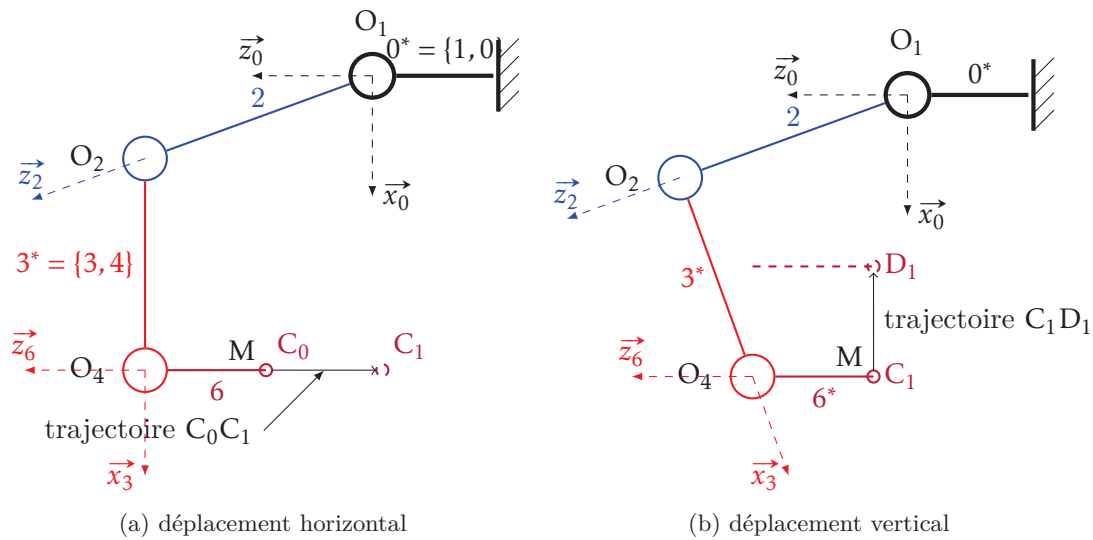


Figure 12 – Modèle cinématique simplifié et trajectoires

On pose pour cette partie

- $0^* = \{0, 1\}$: la classe d'équivalence cinématique formé des deux solides 0 et 1.
- $3^* = \{3, 4\}$: la classe d'équivalence cinématique formé des deux solides 3 et 4.
- $6^* = \{5, 6\}$: la classe d'équivalence cinématique formé des deux solides 5 et 6.

On pose aussi le paramétrage simplifié suivant :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{O_1 O_2} &= c \cdot \vec{z}_2, & \overrightarrow{O_2 O_4} &= d_1 \cdot \vec{x}_3 + f_1 \cdot \vec{y}_3, & \overrightarrow{O_4 M} &= -\ell \cdot \vec{z}_6. \\ \theta_{02} &= (\vec{x}_0, \vec{x}_2), & \theta_{23} &= (\vec{x}_2, \vec{x}_3), & \theta_{36} &= (\vec{z}_3, \vec{z}_6). \end{aligned}$$

Pendant les déplacements, l'axe \vec{z}_6 reste toujours parallèle à \vec{z}_0 .

Q9. Justifier que $\overrightarrow{V_{M \in 6^*/0^*}} = \overrightarrow{V_{O_4 \in 6^*/0^*}}$, déterminer alors θ_{36} .

Q10. Déterminer $\overrightarrow{V_{M \in 6^*/0^*}}$ de la manière la plus concise possible puis dans $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$.

On considère dans un premier temps la trajectoire $C_0 C_1$. Afin que la trajectoire soit le long de (O_1, \vec{z}_0) il faut que $\overrightarrow{V_{M \in 6^*/0^*}} = v_0 \cdot \vec{z}_0$.

Q11. En déduire les deux équations reliant θ_{02} , θ_{23} et v_0 constant.

On pose x_{c0}, y_{c0}, z_{c0} , les coordonnées du point C_0 .

Q12. Ces deux équations sont elles intégrables? Si oui préciser la forme intégrée des ces équations. Comment aurait-on pu les obtenir?

On considère maintenant, le déplacement vertical de $C_1 D_1$, il s'effectue à la même vitesse suivant \vec{x}_0 .

Q13. Préciser la condition sur la vitesse de $\overrightarrow{V_{M \in 6^*/0^*}}$ pour que la trajectoire $C_1 D_1$ soit réalisable.

Q14. Écrire les deux relations correspondantes

On s'intéresse maintenant à la trajectoire de D_1 à D_2 que l'on supposera horizontale, suivant (D_1, \vec{y}_0) . Toutes les liaisons sont libres pour cette partie.

La figure 17 du document réponse présente une vue simplifiée du schéma dans lequel seuls les liaisons en O_0 et O_5 sont représentées, les angles θ_{01} et θ_{56} sont non nuls. Le segment en pointillé, représente la trajectoire que doit suivre le point M pour aller du point D_1 à D_2 .

Q15.

Q15a. Quelle est la trajectoire du point M si toutes les liaisons sont bloquées sauf la liaison L_{56} entre 5 et 6 (tous les θ_{ij} dans la position du schéma cinématique sauf θ_{56}) ?

Q15b. Quelle est la trajectoire du point M si les liaisons $L_{12}, L_{23}, L_{34}, L_{45}, L_{56}$ sont dans la position du schéma et que θ_{01} varie ?

Q15c. Tracer ces trajectoires sur le document réponse.

Q16. Tracer les deux segments $O_0 O_5$ et $O_5 M$ lorsque le point M a atteint l'autre extrémité de la trajectoire.

Q17. Proposer une combinaison de mouvement qui permettent de déplacer le point M le long de $D_1 D_2$.

Q18. Réalisation de la trajectoire pseudo circulaire de dépose : proposer la succession des mouvements permettant de réaliser la trajectoire circulaire :

Q19. Conclure sur la capacité du robot à réaliser toutes les trajectoires.

D. Étude de l'asservissement en position d'un axe du robot

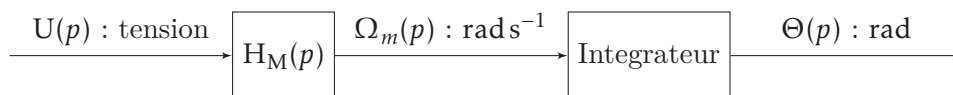
D.1. Étude du moteur en boucle ouverte

Afin de déterminer la fonction de transfert de l'axe de lacet (rotation d'axe (O_0, \vec{z}_0)) du robot ABB (figure 13), la méthode d'identification est proposée ci-après.

On réalise une expérience qui consiste à donner une entrée échelon de tension : $U_0 = 10V$ au moteur de commande de l'axe de lacet et de relever la réponse en boucle ouverte de la position angulaire.

Un relevé de courbe de réponse est donné sur la figure 18 sur le document réponse.

Le schéma – bloc suivant représente cette expérience :



Q20. Si l'on considère que la réponse du moteur associé au réducteur est assimilable à une fonction du premier ordre, de gain statique K_m , et de constante de temps T_m ,

Q20a. écrire la fonction de transfert du moteur et du réducteur $H_M(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U(p)}$;

Q20b. puis la fonction de transfert $H_2(p) = \frac{\Theta(p)}{U(p)}$.

Q21. Déterminer $\Theta(p)$ pour une entrée en échelon $u(t) = U_0 \cdot \mathcal{H}(t)$ avec $\mathcal{H}(t)$ la fonction de Heaviside.

Q22. Déterminer $\lim_{t \rightarrow \infty} (\theta(t))$, $\lim_{t \rightarrow 0} (\theta(t))$ et $\lim_{t \rightarrow 0} (\dot{\theta}(t))$. Vous préciserez les théorèmes utilisés.

Q23. Montrer que la décomposition en élément simple de $\Theta(p)$ s'écrit $\Theta(p) = \frac{A}{p^2} + \frac{B}{p} + \frac{C}{1 + T_m \cdot p}$. Déterminer alors A , B et C .

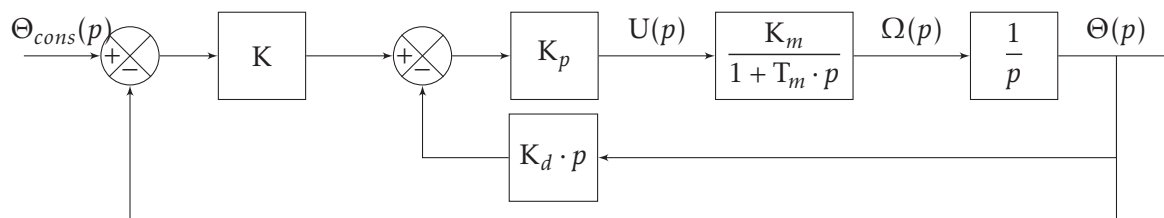
Q24. À partir du tableau des transformées inverses (table 1.1), déterminer $\theta(t)$.

Q25. Indiquer sur le diagramme de la réponse en boucle ouverte (figure 18), le tracé permettant de déterminer la constante de temps T_m et le gain statique K_m de la fonction $H_M(p)$. Préciser les valeurs numériques approchées de T_m , K_m et leurs unités.

Pour la suite, on prendra : $K_m = 0,16 \text{ rad}/(Vs)$ et $T_m = 170 \text{ ms}$.

D.2. Étude de la boucle d'asservissement de position

La boucle d'asservissement proposée par le constructeur est la suivante :



Q26. En considérant $K = 1$, déterminer la fonction de transfert en boucle fermée $H_3(p) = \frac{\Theta(p)}{\Theta_{cons}(p)}$ de cet asservissement. Mettre sous forme canonique.

Q27. Déterminer les coefficients caractéristiques de la fonction de transfert, le gain statique K_s , la pulsation propre non amortie ω_0 et le coefficient d'amortissement ξ en fonction K_p , K_d , K_m et T_m .

On souhaite que le temps de réponse soit inférieur à 200ms et que la réponse soit la plus rapide possible.

Q28. À partir de l'abaque figure 16 et des résultats précédents, déterminer K_d et K_p .

Q29. Tracer l'allure de la courbe réponse pour un échelon de $\theta_{cons}(t) = \pi/4 \text{ rad} \cdot \mathcal{H}(t)$

E. Annexes

E.1. Schéma cinématique

Les deux schémas sont représentés dans la position particulière

$$\theta_{12} = -\theta_{23}$$

et

$$\theta_{01} = 0^\circ, \quad \theta_{34} = 0^\circ,$$

$$\theta_{45} = 0^\circ, \quad \theta_{56} = 0^\circ.$$

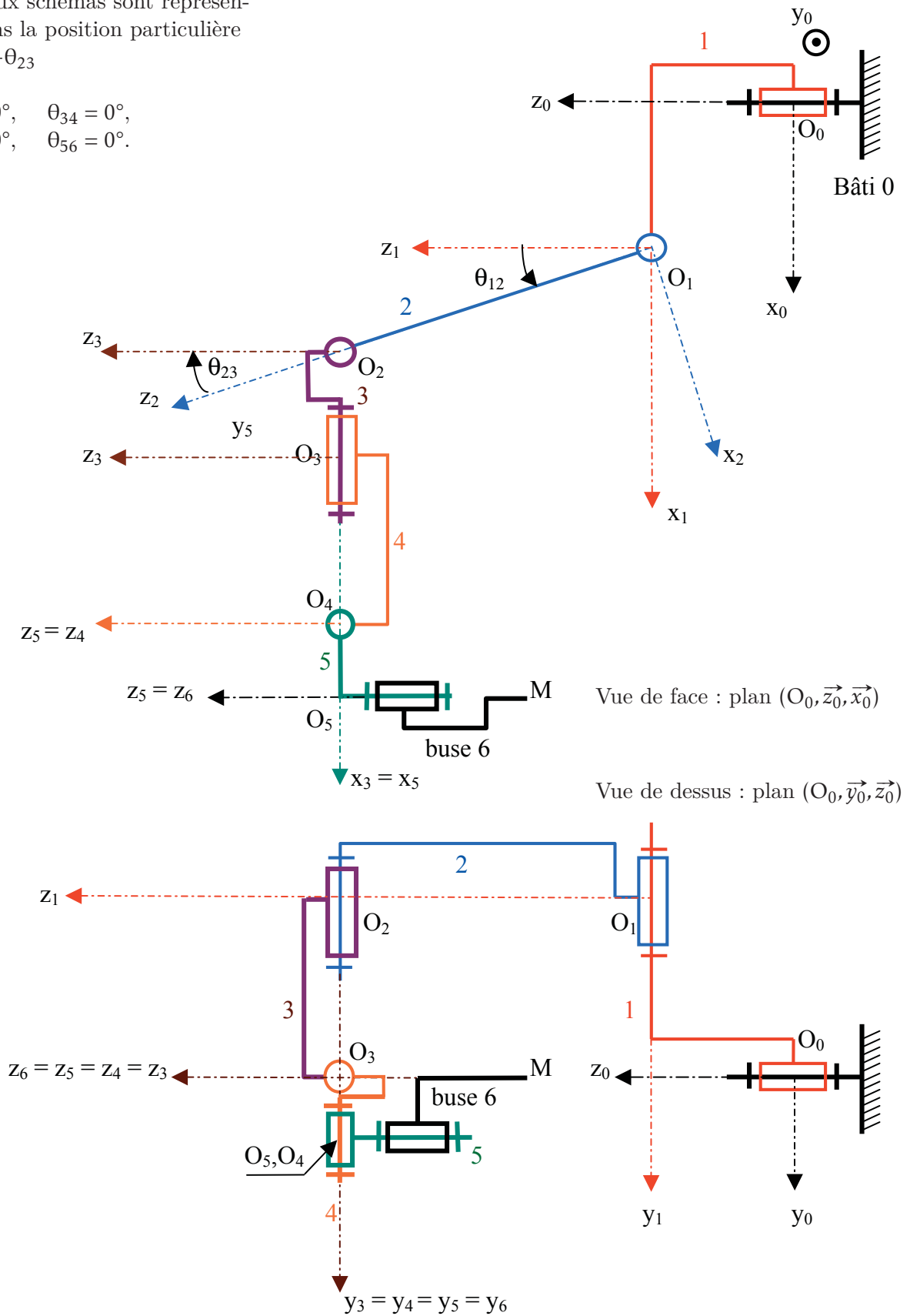


Figure 13 – Schéma cinématique du robot ABB en deux vues planes

Diagramme d'exigence

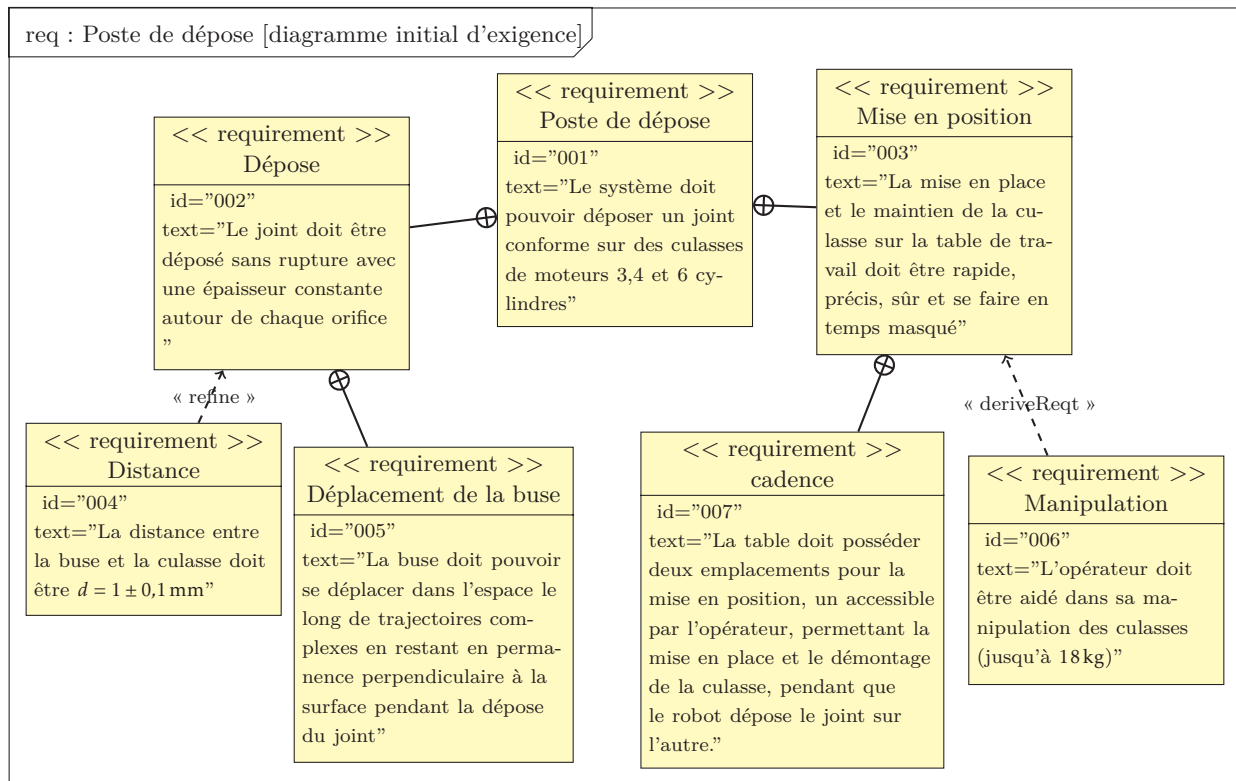


Figure 14 – Diagramme d'exigence général du poste de dépose de joints

Diagramme de définition de blocs

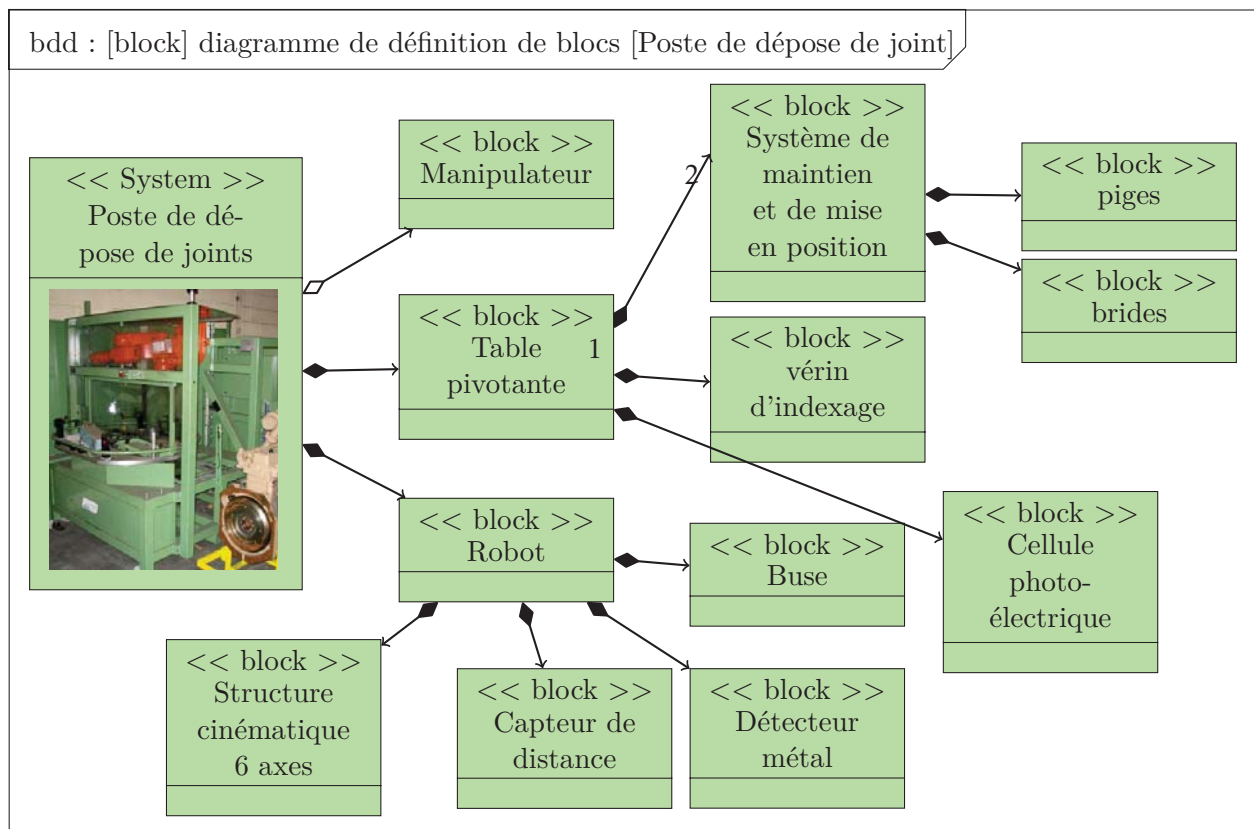


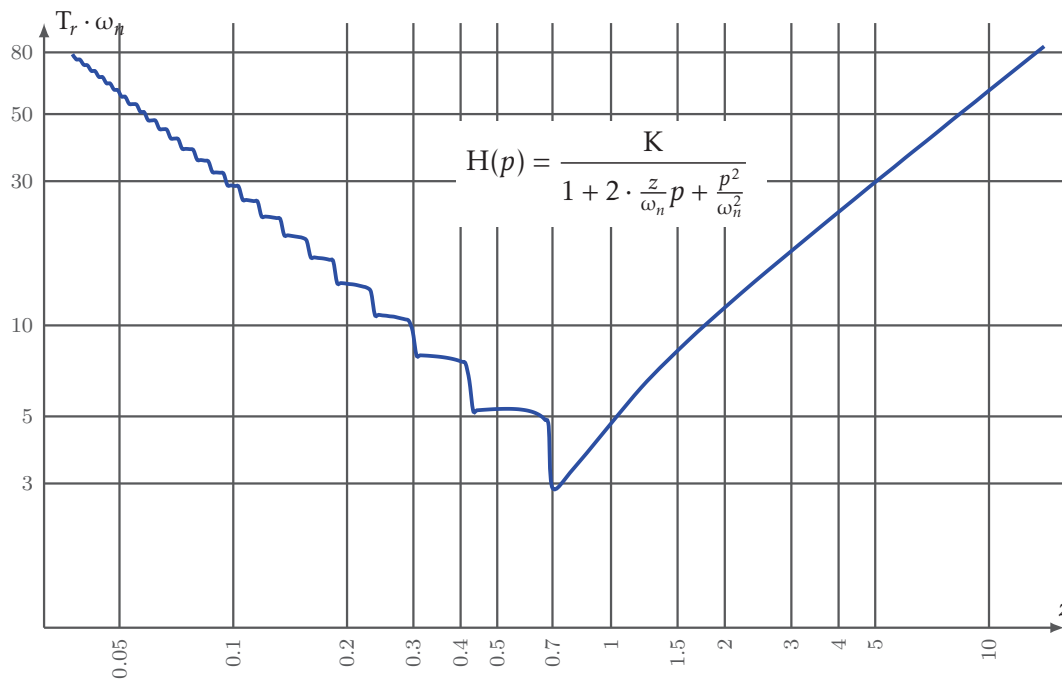
Figure 15 – diagramme de définition de blocs (partiel) du poste de dépose

Transformées de Laplace

$f(t) \cdot \mathcal{H}(t)$	$F(p)$
Dirac : $\delta(t)$	1
$\delta(t - \tau)$	$e^{-\tau p}$
Heaviside : $\mathcal{H}(t)$	$\frac{1}{p}$
$a \cdot \mathcal{H}(t)$	$\frac{a}{p}$
$a \cdot \mathcal{H}(t - \tau)$	$\frac{a}{p} \cdot e^{-\tau p}$
$a \cdot t \cdot \mathcal{H}(t)$	$\frac{a}{p^2}$
$t^n \cdot \mathcal{H}(t)$	$\frac{n!}{p^{n+1}}$
$e^{-at} \cdot \mathcal{H}(t)$	$\frac{1}{p + a}$
$\frac{1 - e^{-at}}{a} \cdot \mathcal{H}(t)$	$\frac{1}{p \cdot (p + a)}$

Table 1.1 – Transformées de Laplace usuelles

Abaque des temps de réponse réduits


 Figure 16 – Abaque du temps de réponse réduit $T_r \cdot \omega_n$ d'un système du second ordre

Documents réponses

Q 1

n° exigence	Constituants satisfaisant l'exigence
Id 04	
Id 05	
Id 06	
Id 07	

Q 3 : Algorithme à compléter

 Algorithme 1 : Algorithme partiel de dépose de joint

Entrées :

 C_0 : point C_1, C_4, C_5 : listes de points $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$: listes de points

Sorties : Dépose de joint

1 *AtteindrePoint*(C_0)2 *AtteindrePoint*(C_1)3 si *DetecterMetal* alors4 pour $DD \in [\dots\dots\dots]$ faire5 | *AtteindrePoint*(DD)6 | *DeposerJoint*

7 fin

8 -----

9 -----

10 -----

11 -----

12 -----

13 -----

14 -----

15 -----

16 -----

17 -----

18 -----

19 -----

20 -----

21 -----

22 -----

23 -----

24 -----

25 -----

26 fin

27 *AtteindrePoint*(C_0)

Q 15 et Q 16 : Tracé des trajectoires

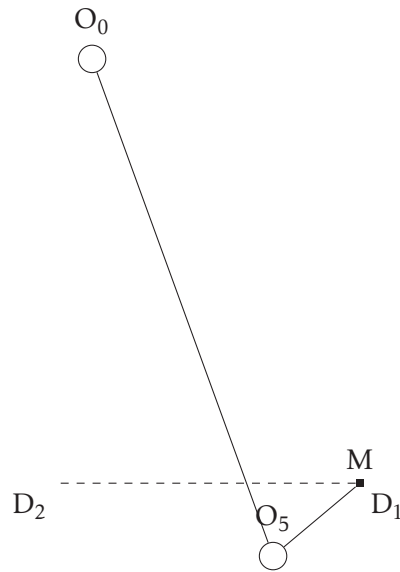


Figure 17 – vue simplifiée selon \vec{z}_0

Q 25 : Détermination graphique de T_m et K_m .

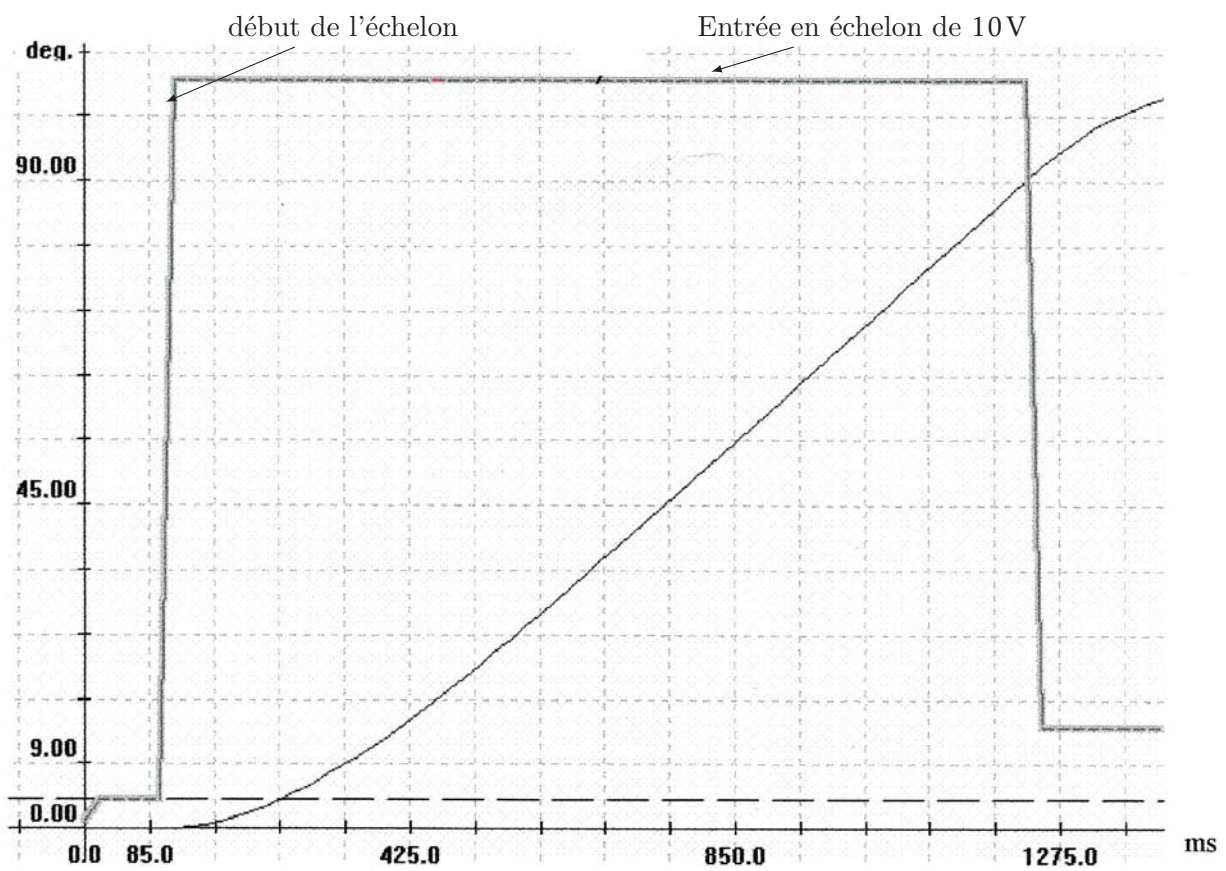


Figure 18 – Réponse temporelle à un échelon