

PSI 2023–2024
Sciences de l'Ingénieur

DS N°4 : Sujet A

Le 15 Janvier 2024 - Durée 4h

Poste de palettisation de Bidons

D'après Sujet CCP MP 2010



Vue générale du robot KUKA de palettisation

Composition du sujet

Présentation et sujet :

Pages 1/19 à 11/19

Annexes

Pages 12/19 à 17/19

Documents réponses :

Pages 1/4 à 4/4

Consignes pour la réalisation du devoir surveillé

Ce sujet est issu de l'épreuve de SI du concours CCP MP 2010. Ce sujet a été largement modifié

Vous traiterez l'ensemble des questions en répondant sur copie ou sur les documents réponses lorsque cela est demandé. Documents réponse que vous dégrafferez et joindrez à votre copie.

Mise en situation

La société Agronutrition est une PME du tissu économique midi-pyrénéen. Elle conçoit, fabrique et commercialise une large gamme de compléments nutritionnels destinés à améliorer la qualité et/ou le rendement des productions végétales (grandes cultures, vigne, arboriculture, maraîchage). Utilisables en Agriculture Biologique, ces compléments permettent d'améliorer les qualités nutritives des produits agricoles (teneur en protéines, teneur en sucres, teneur en oligo-éléments, résistance aux meurtrissures, conservation, etc...). L'outil industriel répond aux exigences spécifiées en terme d'Installation Classée pour la Protection de l'Environnement. Il est spécifiquement dédié à la formulation, la fabrication et le conditionnement des produits.

L'étude se limitera à l'atelier de conditionnement des produits, aujourd'hui en partie automatisé.

1- Atelier de conditionnement des produits

Les produits réalisés par l'entreprise Agronutrition se présentent sous forme liquide et sont élaborés et stockés dans des cuves avant d'être conditionnés dans des bidons de 5, 10, 20 ou 40 litres.

Les bidons vides sont livrés par palettes. Le conditionnement des produits consiste en un certain nombre d'opérations réalisées sur des postes spécifiques (Voir schéma d'implantation **Figure 1 page 2**):

- ☞ **Poste 1** : dépalettisation des bidons vides.
- ☞ **Poste 2** : remplissage des bidons.
- ☞ **Poste 3** : bouchage des bidons.
- ☞ **Poste 4** : marquage jet d'encre des bidons pour assurer leur traçabilité.
- ☞ **Poste 5** : collage étiquette.
- ☞ **Poste 6** : palettisation des bidons.
- ☞ **Poste 7** : stockage des palettes pleines.



Seules les opérations 2, 3, 4, 5 et 6 sont aujourd'hui entièrement automatisées. En particulier, la palettisation des bidons pleins au poste 6 est réalisée par un robot Kuka KR 180-2 PA dont les caractéristiques sont précisées en **annexe 1, page 12 à 15**.

Schéma d'implantation

La **Figure 1 ci-contre** représente le schéma d'implantation de l'atelier de conditionnement.

Les bidons sont déposés au poste 1 sur un tapis de transfert motorisé en mouvement continu. La coordination des postes est basée sur le nombre de bidons présents dans les stocks intermédiaires : un poste n'effectuera un cycle de production normal que si au moins un bidon est présent dans le stock amont et que le stock aval n'est pas saturé.

Le poste de palettisation 6 est protégé par une enceinte grillagée. Par mesure de sécurité, son accès est interdit durant les évolutions du robot.

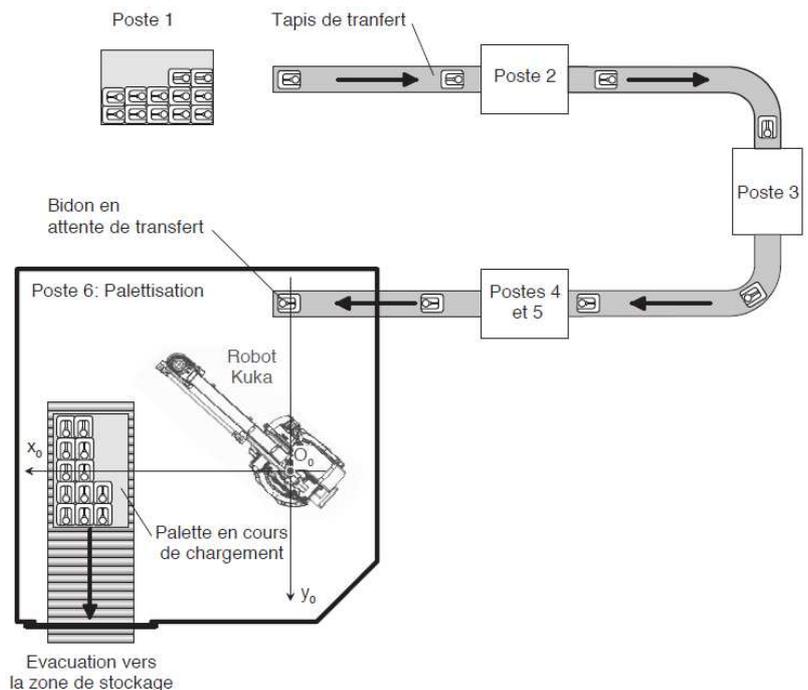


Figure 1 : Schéma d'implantation

Exigences du cahier des charges

- ☞ La production est de 20 000 litres de produit par jour.
- ☞ L'entreprise travaille 8 heures par jour.
- ☞ Les palettes sont aux normes européennes de dimensions (mm) : 1200×800 .
- ☞ Le temps nécessaire au remplacement d'une palette pleine par une palette vide au poste 6 est estimé à 2 minutes.

On note d'autre part (voir **Figure 2 ci-dessous**) :

- ☞ **m** : nombre de bidons rangés par longueur de palettes ;
- ☞ **n** : nombre de bidons rangés par largeur de palettes ;
- ☞ **c** : nombre de couches de bidons par palette.

Le **Tableau 1 cidessous**, indique les nombres *n*, *m*, *c* de bidons par palette ainsi que leurs dimensions *d_i* en fonction de leur capacité. La dimension *d₃* correspond à la hauteur d'un bidon.

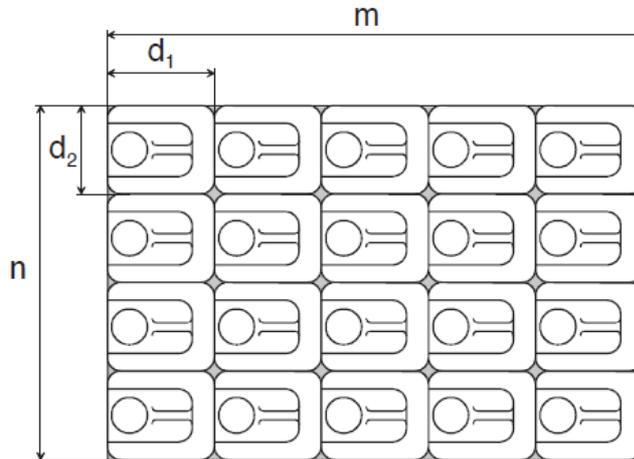


Figure 2 : Palette vue de dessus

Tableau 1 : Caractéristiques des bidons suivant leur capacité

Capacité (litres)	Conditionnement sur la palette		
	m × <i>d₁</i> (mm)	n × <i>d₂</i> (mm)	c × <i>d₃</i> (mm)
5	10 ×120	5 ×160	5 ×310
10	6 ×200	5 ×160	4 ×360
20	5 ×240	4 ×200	3 ×450
40	4 ×300	4 ×200	2 ×720

Question 1 : On se place dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire celui consistant à palettiser des bidons de 5 litres. On se propose de déterminer la durée maximale nécessaire à la dépose d'un bidon sur la palette. A partir des données définies dans le cahier des charges :

- a) Déterminer le nombre de bidons de 5 litres à palettiser par jour ;
- b) En déduire le nombre de palettes à produire par jour ;
- c) En déduire le temps nécessaire en minutes, à la composition d'une palette, en incluant le temps de changement d'une palette ;
- d) En déduire la durée maximale nécessaire à la dépose d'un bidon sur la palette en secondes.

2- Etude du poste de palettisation 6

La pièce maîtresse du poste 6 est un robot de palettisation Kuka KR 180-2 PA (voir **annexe 1, pages 12 à 15**). Ses fonctions de service (voir **Figure 3** ci-dessous) sont définies ci-après :

FP1	Déposer les bidons sur la palette
FP2	Déposer les cartons sur la palette (fonction non étudiée)
FS3	Piloter le robot
FS4	Alimenter en énergie électrique les actionneurs
FS5	Protéger l'environnement lors des évolutions du robot

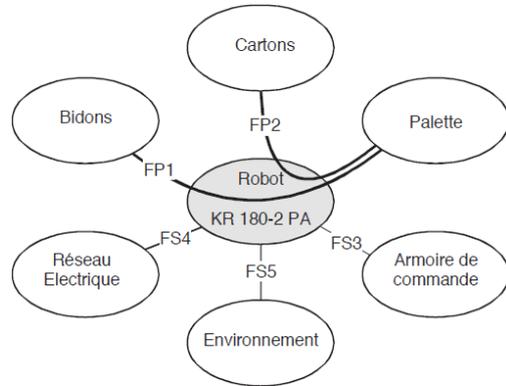


Figure 3 : Diagramme des interacteurs

Objectif

On se propose de vérifier que les caractéristiques du robot permettent de satisfaire la cadence de production imposée par le cahier des charges.

Données

- ☞ Le temps t_{p2} de remplissage d'un bidon de 5 litres au poste 2 est de 6 secondes.
- ☞ Le temps t_{p3} de bouchage d'un bidon au poste 3 est de 3 secondes.
- ☞ Les opérations associées aux postes 4 et 5 se font à la " volée ", sans arrêt du bidon, leur durée est donc négligeable.
- ☞ Le grafcet de la **Figure 16, annexe 2, page 16** représente le fonctionnement normal du poste de palettisation. Les positions du robot sont spécifiées dans l'**annexe 3, page 17** ainsi que les étapes correspondantes du grafcet de fonctionnement normal.
- ☞ Dans la position de référence notée P_0 , $\alpha_1 = 45^\circ$ (voir **Figure 13, annexe 1, page 14** pour la signification de l'angle α_1).

Caractéristiques des déplacements du robot

Une simulation a permis d'estimer les amplitudes des déplacements des différents axes A_i du robot lors de la dépose d'un bidon sur la palette.

Afin de déterminer la durée d'un déplacement, seul est pris en compte, parmi les axes A_i sollicités, celui dont l'amplitude, en valeur absolue, est la plus importante lors de ce déplacement.

Les résultats sont consignés dans le **Tableau 2, ci-contre**.

Le profil de vitesse imposé lors de ces déplacements est représenté **Figure 4, ci-contre**.

Tableau 2 : Amplitudes maximales lors des déplacements

Cas	Déplacements	Axe	Amplitude maximale	ω_{max} (°/s)	$\dot{\omega}_{max}$ (°/s ²)
1	$P_0 \rightarrow P_1, P_1 \rightarrow P_0$	A_1	45°	105	300
2	$P_1 \rightarrow P_1$	A_1	90°	105	300
3	$P_1 \rightarrow P_2, P_2 \rightarrow P_1, P_1 \rightarrow P_j, P_j \rightarrow P_i$	A_3	15°	105	300

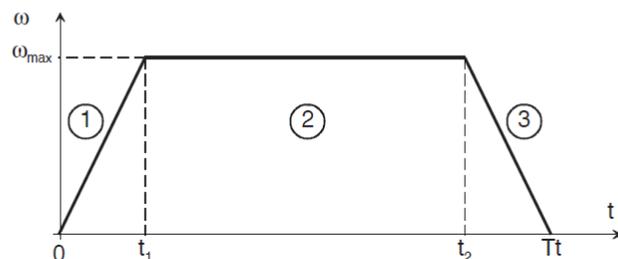


Figure 4 : Profil des vitesses

Question 2-1 : Déterminer, pour les cas 2 et 3 définis dans le **Tableau 2, ci-dessus**, la durée d_i des différentes phases du profil de vitesse. En déduire le temps total T_t nécessaire à ces déplacements. Les résultats seront reportés dans le **tableau 5 du document réponse DR1 page 18**.

Indépendamment des valeurs calculées question 2-1, on retiendra, pour la suite du sujet, les durées suivantes des différentes opérations :

Etapes	Opérations	Durée T_t (s)
1	Déplacer le robot de P0 à P1	0,8
3 et 5	Déplacer le robot de P1 à P2 ou de P2 à P1	0,5
4	Prendre le bidon	0,1
7	Déplacer le robot de P1 à Pi	1,2
8 et 10	Déplacer le robot de Pi à Pj ou de Pj à Pi	0,5
9	Déposer un bidon	0,1
11	Déplacer le robot de Pi à P0	0,8

Le temps nécessaire à la détermination de la position P_i lors de l'étape 6 est négligeable.

Question 2-2 : En supposant nul le temps d'attente d'un bidon lors de l'étape 2, déterminer le temps t_{p6} nécessaire à la dépose d'un bidon sur la palette, temps nécessaire au robot pour partir de la position P0 et revenir en P0.

On considère comme instant initial l'instant où le premier bidon arrive au poste 6 suite à la mise en route du système de conditionnement. Le niveau $Q(t)$ du stock de bidons en amont du poste 6 évolue alors comme indiqué **Figure 5 ci-dessous** avec :

- Phase ① Chargement palette 1
- Phase ② Evacuation palette 1
- Phases ③④ Chargement palette 2
- Phase ⑤ Evacuation palette 2

Le cycle se reproduit ensuite identique à lui-même pour les autres palettes.

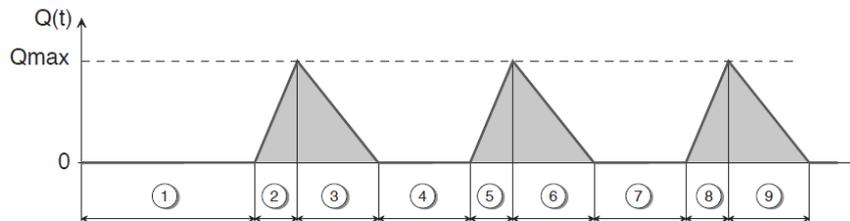


Figure 5 : Evolution du stock en amont du poste 6

Question 2-3 : En considérant la durée des opérations t_{p2} et t_{p3} (voir données de la page3), justifier que le niveau du stock n'évolue pas lors de la phase 1. Quel est alors le temps d'attente d'un bidon lors de l'étape 2 ?

Question 2-4 : Déterminer le niveau Q_{max} du stock amont atteint lors de la phase 2. La longueur de 4 mètres de la zone de stockage amont du poste 6 est-elle suffisante ?

Question 2-5 : Déterminer :

- a) la durée t_3 de la phase 3 ;
- b) le nombre de bidons chargés sur la palette lors de cette phase ;
- c) la durée t_4 de la phase 4.

Question 2-6 : En déduire le temps nécessaire à la formation d'une palette correspondant à la durée des phases 3, 4 et 5. Conclure quant à la satisfaction du cahier des charges.

3- Asservissement en position de l'axe A1

Objectif

On s'intéresse à l'asservissement en position de l'axe A1 du robot 4 axes représenté sur la **figure 6 ci-contre**.

On souhaite s'assurer que la chaîne fonctionnelle d'asservissement permet de respecter les performances souhaitées en termes de précision, stabilité et amortissement tout en restant peu sensible aux variations de l'inertie du robot suivant la charge transportée.

Les performances souhaitées sont données par le cahier des charges dans le **Tableau 3 page 5**

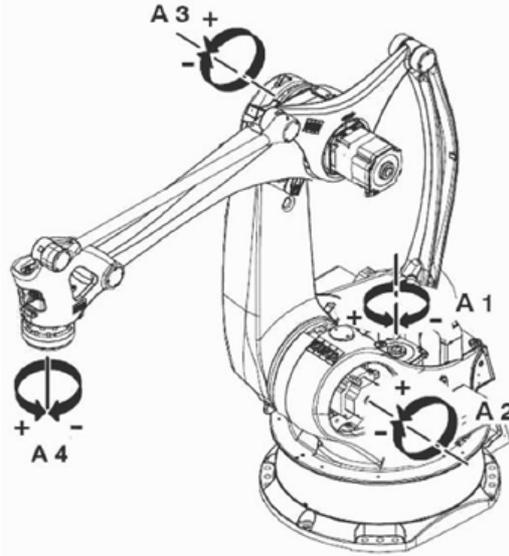


Figure 6 :
Robot 4 axes

Données

L'axe A₁ est mu par un servomoteur qui présente l'avantage de posséder une très faible inertie. Le comportement électromécanique de ce type de moteur est donné par les équations suivantes :

$$u(t) = R \cdot i(t) + e(t) \quad (1)$$

$$e(t) = k_E \cdot \omega_m(t) \quad (2)$$

$$J_e \cdot \frac{d \omega_m(t)}{dt} = c_m(t) - c_r(t) \quad (3)$$

$$c_m(t) = k_C \cdot i(t) \quad (4)$$

Avec $u(t)$ la tension appliquée aux bornes du moteur, $i(t)$ le courant d'induit, $e(t)$ la force contre électromotrice, $\omega_m(t)$ la vitesse de rotation du moteur, $c_m(t)$ le couple délivré par le moteur, $c_r(t)$ le couple résistant ramené sur l'arbre moteur et J_e l'inertie équivalente ramenée sur l'arbre moteur.

Le réducteur retenu pour la transmission du mouvement de l'arbre moteur à l'axe 1 du robot est un réducteur Harmonic-Drive. Les caractéristiques de l'ensemble moteur-réducteur sont les suivantes :

- $k_E = 0,2 \text{ V.s.rad}^{-1}$: constante de force électromotrice ;
- $k_C = 0,2 \text{ N.m.A}^{-1}$: constante de couple ;
- $R = 2 \text{ } \Omega$: résistance de l'induit ;
- $J_m = 4 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$: inertie de l'ensemble axe moteur et réducteur sur l'arbre moteur ;
- $N = 200$: rapport de réduction.

L'inertie J_1 du robot autour de l'axe (O_1, \vec{z}_1) dépend de la configuration du robot et de la masse transportée. Elle est telle que :

- $J_{1\text{mini}} = 50 \text{ kg.m}^2$ lorsque le déplacement a lieu à vide ;
- $J_{1\text{maxi}} = 200 \text{ kg.m}^2$ lorsque la masse transportée est de 50 daN.

L'inertie équivalente J_e ramenée sur l'arbre moteur est alors égale à :

- $J_{e\text{mini}} = 5,25 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ lorsque le déplacement a lieu à vide ;
- $J_{e\text{maxi}} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ lorsque la masse transportée est de 50 daN.

Cahier des charges

Stabilité :	Marge de phase supérieure à 45° : $M_\phi \geq 45^\circ$.
Précision :	Erreur statique inférieure à $0,005^\circ$: $\epsilon_S \leq 0,005^\circ$ (avec ou sans perturbation) Erreur de poursuite (avec ou sans perturbation) en réponse à une consigne en rampe de pente $\Omega_0 = 105^\circ/s$ inférieure à 1° : $\epsilon_T < 1^\circ$
Amortissement :	Dépassement de la valeur finale inférieur à 20% pour un échelon de consigne
Rapidité :	Un temps de réponse à 5 % inférieur à 0,1 s : $t_{5\%} \leq 0,1$ s

Tableau 3 : Cahier des charges de l'asservissement en vitesse et position de l'axe A1

Modélisation de l'asservissement

La chaîne fonctionnelle de l'asservissement de l'axe A1 est représentée **Figure 7, ci-dessous**.

La boucle interne réalise une correction de vitesse à partir de la tension $u_g(t)$ fournie par une génératrice tachymétrique de gain K_g montée en prise directe sur le moteur. G est le gain réglable de l'amplificateur de puissance.

La boucle externe réalise la correction de position à partir de la tension $u_r(t)$ fournie par le capteur de position de gain K_r monté en prise directe sur l'arbre de sortie du réducteur. La fonction de transfert du réducteur est notée $R(p)$ et celle du correcteur $C(p)$.

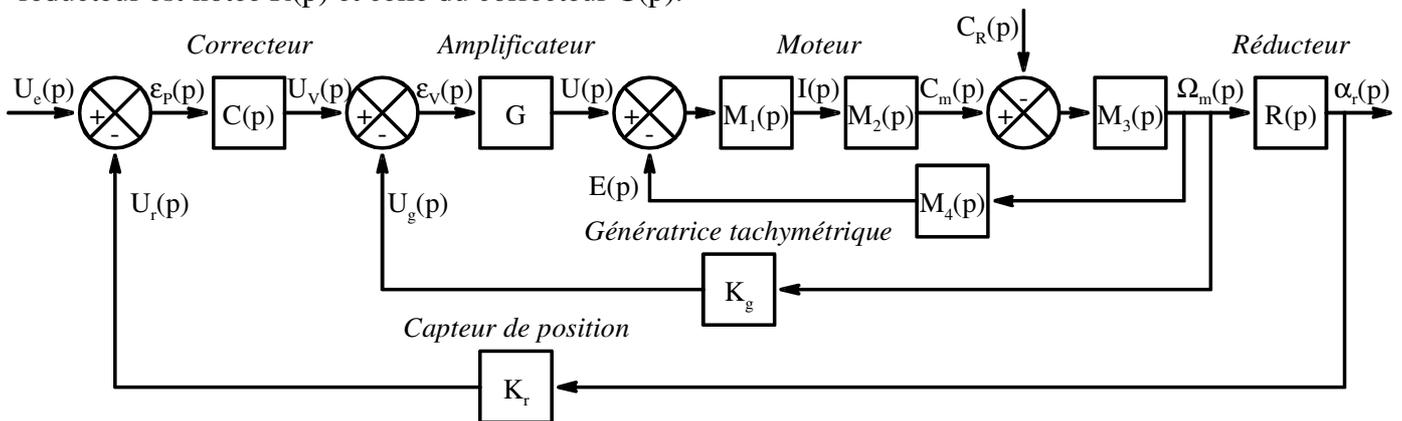


Figure 7 : Asservissement en vitesse et position de l'axe A1

Dans les 2 paragraphes suivants (question 3.1 à 3.8) on suppose que la perturbation est nulle : $C_r(p) = 0$.

Fonction de transfert du moteur

Question 3-1 : Donner l'expression littérale de l'inertie équivalente J_e ramenée sur l'arbre moteur en fonction de J_m et de J_1 .

Question 3-2 : Donner les transformées de Laplace des équations (1) à (4) du moteur définies au paragraphe 3.2 page 6 en considérant nulles les conditions initiales.

Question 3-3 : En déduire les expressions littérales, en fonction de la variable de Laplace p et des constantes du moteur, des fonctions de transfert : $M_1(p)$, $M_2(p)$, $M_3(p)$ et $M_4(p)$.

Question 3-4 : En déduire la fonction de transfert $H_m(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U(p)}$ du moteur (avec $C_r(p) = 0$). On l'exprimera sous la forme canonique avec un gain K_m et une constante de temps τ_m . Donner les expressions littérales de K_m et τ_m et donner leurs valeurs numériques avec unités.

Question 3-5 : Calculer, suivant l'inertie J_e mini ou maxi du robot, les caractéristiques suivantes du moteur.

- constante de temps τ_m (mini et maxi) ;
- temps de réponse à 5 % (mini et maxi) ;
- bande passante à -3 dB (mini et maxi) ;

Conclure quant à l'influence de l'inertie du robot sur les performances du moteur.

Étude de la boucle de vitesse

Question 3-6 : La tension $u_g(t)$ en sortie de la génératrice tachymétrique varie de 0 à 12 V quand la vitesse de rotation du moteur varie de 0 à 3500 tr.min⁻¹. En déduire la valeur en V.s.rad⁻¹ du gain K_g de la génératrice tachymétrique.

Question 3-7 : Déterminer, en fonction de G , K_g , K_m et τ_m , $H_T(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U(p)}$ la fonction de transfert de la boucle tachymétrique. On l'exprimera sous la forme canonique d'un système du premier ordre de gain K_T et de constante de temps τ_T . Donner les expressions littérales de K_T et τ_T .

Question 3-8 : On choisit pour l'amplificateur un gain $G = 316$ (sans unités) en déduire, pour J_{emini} et J_{emaxi} , les valeurs numériques de K_T et τ_T .

Étude de la boucle de position

La boucle de position est représentée par la **figure 8 ci-dessous**.

- $K_r = 4 \text{ V.rad}^{-1}$ gain du capteur de position ;
- K_a : gain de l'adaptateur du signal de consigne $\alpha_c(t)$;
- Le signal de consigne $\alpha_c(t)$ est exprimé en degré ;
- La position réelle de l'axe A1 peut être exprimée en radian : $\alpha_r(t)$ ou en degré $\alpha(t)$;
- $C(p)$ est la fonction de transfert du correcteur
- $H_T(p)$ est la fonction de transfert de la boucle tachymétrique : $H_T(p) = \frac{K_T}{1 + \tau_T.p}$
- Le comparateur introduisant la perturbation a été déplacé à gauche de la boucle tachymétrique.

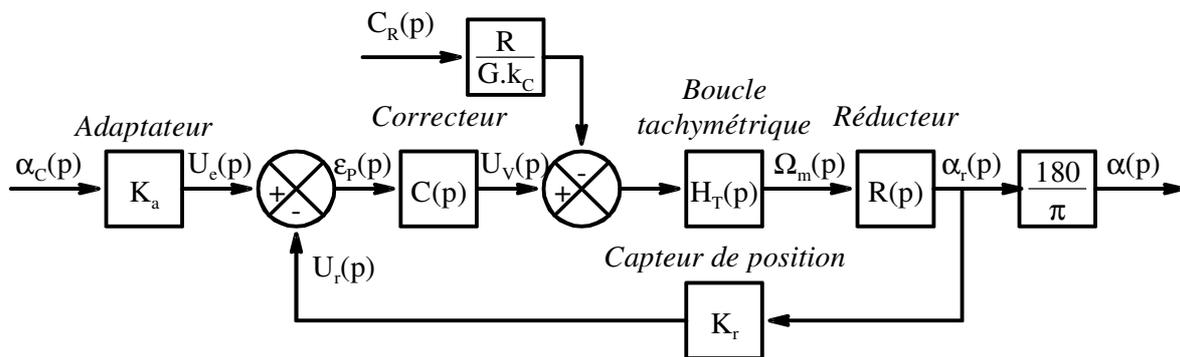


Figure 8 : Asservissement en position de l'axe A1

Question 3-9 : Déterminer en fonction de la variable de Laplace p et des constantes du système :

- La fonction de transfert du réducteur $R(p)$
- Le gain K_a de l'adaptateur (pour un fonctionnement normal : $\epsilon_p(p) = 0$ lorsque $\alpha(p) = \alpha_c(p)$)

Question 3-10 : Compléter les deux schémas bloc du **document réponse DR2 page 18**. Sachant que ces schémas bloc sont équivalents à celui de la figure 8 ci-dessus. Vous utiliserez pour cela la variable de Laplace p et les constantes du système $N, K_T, \tau_T, R, G, k_C$ et K_r , ainsi que les valeurs numériques 180 et π .
 Puis donner sur le **document réponse DR2** l'expression de la FTBO non corrigée (FTBO pour $C(p) = 1$).

Dimensionnement du correcteur

Quelque soit les résultats obtenus précédemment on supposera que la boucle de position de la **figure 9 ci-dessous** est équivalent à celle de la **figure 8 page 7**.

- $F_1(p)$ est la fonction de transfert en amont de la perturbation : $F_1(p) = 2,21 \text{ N.m.deg}^{-1}$
 - $F_2(p)$ est la fonction de transfert en aval de la perturbation : $F_2(p) = \frac{0,272}{p.(1 + \tau_T.p)} \text{ deg.N}^{-1}.\text{m}^{-1}$
- Avec : $\tau_T \in [5.10^{-3} \text{ s} ; 8,5.10^{-3} \text{ s}]$

- On utilise un correcteur proportionnel de gain K_P :
- $C(p) = K_P.$

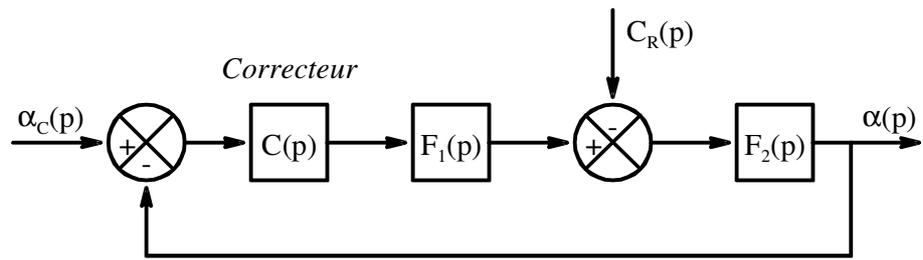


Figure 9 : Asservissement en position de l'axe A1 (Schéma bloc simplifié)

Question 3-11 : Donner l'expression numérique de la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de cet asservissement en fonction de p, τ_T et K_P .

On donne ci-dessous le diagramme de Bode de la Fonction de Transfert en Boucle Ouverte non corrigée ($C(p) = 1$) pour les deux valeurs extrémales de la constante de temps τ_T :

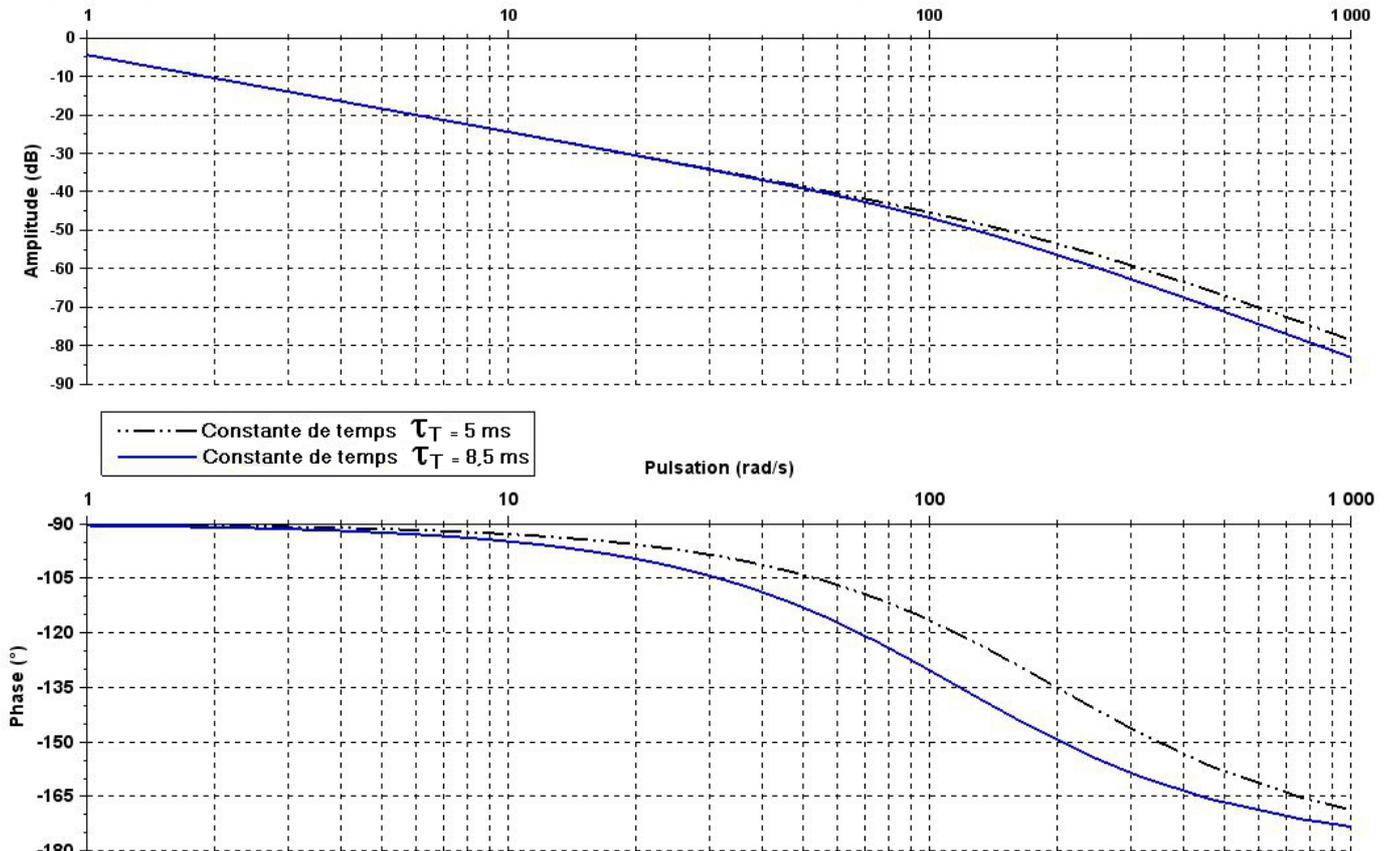


Figure 10 : Diagrammes de Bode de la FTBO non corrigée

Question 3-12 : A partir de cette expression numérique de la FTBO :

- Donner l'expression numérique en fonction de la pulsation ω , de τ_T et K_P , du gain dynamique en décibel $G_{dBBO}(\omega)$ de la FTBO de cet asservissement.
- Déterminer la condition sur le gain K_P permettant de respecter le critère de stabilité du cahier des charges, quelque soit la valeur de τ_T . Détailler votre raisonnement en utilisant le diagramme de Bode ci-dessus ou les expressions numériques du gain dynamique et de la phase de la FTBO

Question 3-13 : On suppose que la consigne est une rampe de pente $\Omega_0 = 105 \text{ deg.s}^{-1}$. Et que la perturbation est un couple constant $C_{r0} = 0,2 \text{ N.m}$

- Déterminer en fonction de C_{r0} et K_P , l'expression de ε_S l'erreur statique avec perturbation. Vous justifierez précisément votre résultat.
- Déterminer en fonction de C_{r0} , Ω_0 et K_P , l'expression de l'erreur de trainage ε_T due à la consigne en rampe avec la perturbation. Vous justifierez précisément votre résultat.
- En déduire la condition sur le gain K_P permettant de respecter les deux critères de précision du cahier des charges.

Question 3-14 : On utilise un correcteur de gain $K_P = 200$: $C(p) = 200$.

- Déterminer avec ce correcteur, l'expression numérique de la Fonction de Transfert en Boucle Fermée. Puis déterminer les valeurs de ses éléments caractéristiques pour les 2 valeurs de τ_T .
- On rappelle que $D_{k\%}$ la valeur du $k^{\text{ième}}$ dépassement relatif pour un second ordre est fonction du facteur d'amortissement ξ par la relation : $D_{k\%} = e^{\frac{-k\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$. Conclure sur le respect du cahier des charges avec ce correcteur de gain $K_P = 200$. Vous justifierez précisément votre réponse pour chacun des critères du cahier des charges.

Amélioration des performances de l'asservissement

On souhaite maintenant obtenir un asservissement permettant d'obtenir une erreur statique en réponse à un échelon et une erreur de trainage en réponse à une rampe toutes les deux nulles.

Question 3-15 : Parmi les quatre types de correcteur suivant : Proportionnel, Intégral, Proportionnel Intégral et à Avance de Phase, quels sont ceux qui à priori permettent de répondre au cahier des charges avec une erreur (statique et de trainage) nulle ? Justifier votre réponse pour chacun des quatre types.

Pour satisfaire à tous les critères du cahier des charges (temps de réponse inclu) avec une erreur nulle, on utilise un correcteur PID (Proportionnel Intégral Dérivé) de fonction de transfert : $C(p) = \frac{K \cdot (1 + T \cdot p)^2}{p}$.

Pour cela ce correcteur est dimensionné de tel sorte à ce que sa marge de phase soit de $M_\phi = 70^\circ$ à la pulsation de coupure $\omega_{0dB} = 75 \text{ rad.s}^{-1}$.

Question 3-16 : Donner les expressions, en fonction de ω , T et K , de la phase et du gain dynamique de ce correcteur à la pulsation ω .

Question 3-17 : Déterminer les constantes K et T de ce correcteur permettant d'obtenir une marge de phase de $M_\phi = 70^\circ$ à la pulsation de coupure $\omega_{0dB} = 75 \text{ rad.s}^{-1}$. Vous ferez le dimensionnement de ce correcteur pour une constante de temps $\tau_T = 8,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$. On suppose que si le cahier des charges est respecté pour $\tau_T = 8,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ il l'est également pour $\tau_T = 5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$.

Avec le correcteur PID ainsi dimensionné, on obtient (voir figure 11 ci-dessous) par simulation numérique les réponses temporelles du système à un échelon de 20° et une rampe de $105^\circ \cdot s^{-1}$.

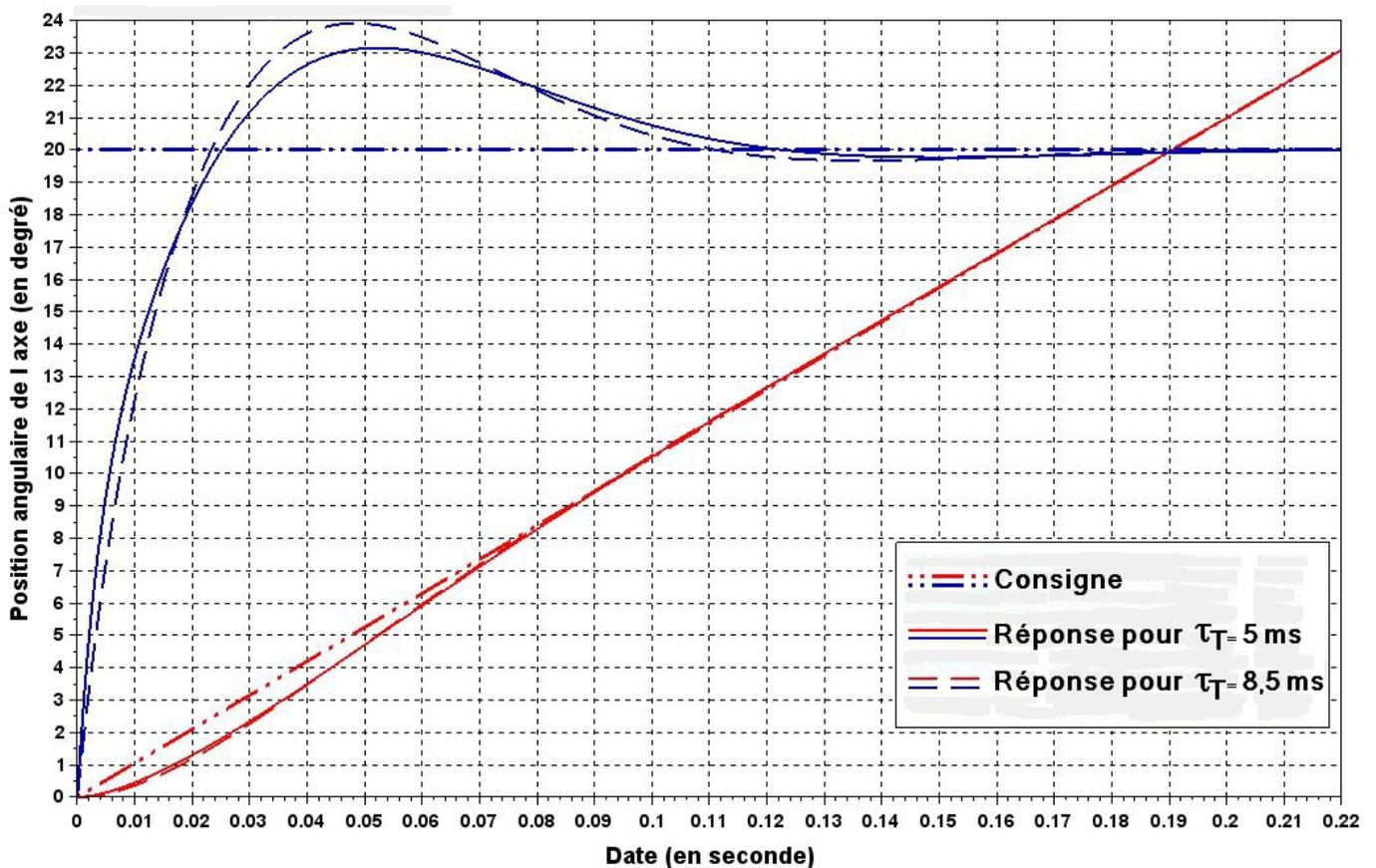


Figure 11 : Réponses temporelles (5 simulations) avec le correcteur PID

Question 3-18 : Le cahier des charges est-il respecté ? Justifier votre réponse.

4- Analyse géométrique du robot

Objectif

On souhaite s'assurer que, pour tous les conditionnements de produit, le robot pourra mettre en position le bidon le plus éloigné situé dans les coins du bord extérieur de la palette.

Données

- L'espace de travail du robot est défini (Figure 15, annexe 1, page 15).
- Les palettes sont disposées symétriquement par rapport à l'axe (O_0, \vec{x}_0) (voir Figure 1, page 1) et leur bord intérieur est situé à une distance de 1,6 mètre du point O_0 .
- On suppose que l'axe vertical de symétrie d'un bidon est confondu avec l'axe (O_4, \vec{z}_4) et que la face supérieure d'un bidon est située dans le plan.
- Distance d'approche $P_i P_j = 0,5 \times \text{hauteur d'un bidon}$ (voir Grafset annexe 2, page 16).
- Le plan supérieur de la palette est situé à une hauteur de 200 mm du sol.

Question 4-1 : A partir des données précédentes, calculer, pour les quatre types de bidons, la hauteur par rapport au sol du plan supérieure de la palette. En déduire pour quel type de bidon le conditionnement est le plus critique.

Question 4-2 : Répondre uniquement sur le document réponse DR3 page 19/19.

Pour ce type de bidon :

- a) Représenter sur la figure 17 du document réponse DR3 page 19/19 la palette pleine (un tracé à main levée est suffisant).
- b) Indiquer sur ce document les coordonnées X_4 , Y_4 , et Z_4 du point O_4 dans le repère $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ dans le cas (ou les cas) le plus défavorable.
- c) En déduire la distance d_4 entre ce point O_4 et l'axe (O_0, \vec{z}_0) et conclure sur la capacité du robot à réaliser la palettisation.

5- Analyse cinématique du robot

Objectif

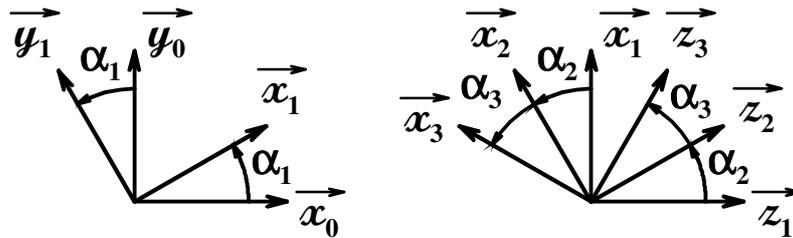
On souhaite s'intéresser à la manière de piloter les axes A2 et A3 du robot pour obtenir un déplacement vertical du poignet.

Données et paramétrage

On donne les dimensions du robot dont le schéma cinématique est donné Figure 13 page 15/20 :

$O_2O_3 = O_6O_7 = 1250 \text{ mm}$ $O_3O_{10} = O_8O_9 = 1350 \text{ mm}$ $O_2O_6 = O_3O_7 = O_3O_8 = O_9O_{10} = 500 \text{ mm}$

On donne les paramètres angulaires $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ liés aux liaisons entre les solides 0&1, 1&2 et 2&3. D'où :



D'autre part on a : $\vec{z}_0 = \vec{z}_1$ $\vec{y}_1 = \vec{y}_2 = \vec{y}_3$ $O_2O_3 = 1250 \cdot \vec{x}_2$ $O_3O_{10} = 1350 \cdot \vec{x}_3$
 Et : $\vec{\Omega}_{2/1} = \dot{\alpha}_2 \cdot \vec{y}_2$ $\vec{\Omega}_{3/2} = \dot{\alpha}_3 \cdot \vec{y}_3$

Question 5-1 : Justifier l'égalité suivante entre les vecteurs vitesse : $\vec{V}_{O4 \in 4/1} = \vec{V}_{O10 \in 3/1}$

Question 5-2 : Déterminer l'expression des vecteurs vitesses $\vec{V}_{O3 \in 2/1}$ et $\vec{V}_{O10 \in 3/1}$. Et en déduire les coordonnées du vecteur vitesse $\vec{V}_{O10 \in 3/1}$ dans la base $(\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$

Question 5-3 : La position du bidon dans l'espace se fait avec des coordonnées cylindriques. celles du point O_4 sont : ρ, h et α_1 on a donc : $\vec{O}_0\vec{O}_4 = \rho \cdot \vec{x}_1 + h \cdot \vec{z}_1$ avec : $\alpha_1 = (\widehat{x_0, x_1})$ et $\vec{z}_1 = \vec{z}_0$

- a) Déterminer $\dot{\rho}$ et \dot{h} en fonction de $\dot{\alpha}_2, \dot{\alpha}_3, \alpha_2$ et α_3 .
- b) Quel est l'intérêt d'un tel résultat ?
- c) On se place dans le cas d'un déplacement vertical du Bidon à la vitesse $V_z = \dot{h}$ on a : $\dot{\rho} = \dot{\alpha}_1 = 0$. Déterminer l'expression des vitesses angulaires des axes A2 et A3 (soit $\dot{\alpha}_2$ et $\dot{\alpha}_3$) en fonction de la vitesse verticale du bidon : V_z et des positions angulaires des axes 2 et 3 : α_2 et α_3 .

----- Fin de l'énoncé -----

ANNEXE 1 : CARACTERISTIQUES DU ROBOT KUKA KR 180-2 PA

Domaines d'application

Le robot Kuka KR 180-2 PA est un robot industriel à quatre axes à cinématique articulée, pouvant être mis en œuvre pour toutes les tâches avec positionnement point par point et, de manière limitée, pour le contournage.

Ses principaux domaines d'application sont :

- la palettisation,
- la manipulation,
- la dépalettisation.



Figure 10 : Robot Kuka KR 180-2 PA

Ensemble mécanique du robot

Le robot (voir **Figure 11, page 17**) est formé d'une embase fixe **0** sur laquelle tourne autour d'un axe vertical le "bâti de rotation" ou fût **1** qui supporte l'épaule **2**, le bras **3** et le poignet **4**.

La charge utile et le poids mort des composants articulés sont compensés statiquement par un système d'équilibrage **9**. Ce système assiste l'épaule **2**.

La bride de fixation du poignet permet de monter le préhenseur **5** (voir **Figure 13, page 17**).

La **Figure 13** représente le schéma cinématique du robot Kuka. On associe à chaque solide k , $k = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, un repère $R_k (O_k, \vec{x}_k, \vec{y}_k, \vec{z}_k)$. L'embase **0** est fixée au sol. Le repère $R_0 (O_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$, lié à l'embase, constitue le repère absolu.

Les liaisons entre les différents solides sont toutes de type pivot :

- d'axe $(O_0, \vec{z}_0) = (O_1, \vec{z}_1)$ et de paramètre angulaire α_1 entre l'embase **0** et le bâti de rotation **1** ;
- d'axe (O_2, \vec{y}_2) et de paramètre angulaire α_2 entre l'épaule **2** et le bâti de rotation **1** ;

- d'axe (O_3, \vec{y}_3) et de paramètre angulaire α_3 entre le bras **3** et l'épaule **2** ;
- d'axe $(O_4, \vec{y}_4) = (O_5, \vec{y}_5)$ et de paramètre angulaire α_4 entre le poignet **4** et le préhenseur **5** ;
- d'axes (O_{10}, \vec{y}_4) et (O_9, \vec{y}_4) entre le poignet **4** et respectivement le bras **3** et la barre **8** ;
- d'axes (O_6, \vec{y}_1) entre la barre **6** et le bâti rotatif **1** ;
- d'axes (O_7, \vec{y}_3) , (O_8, \vec{y}_3) et (O_3, \vec{y}_3) entre la pièce **7** et respectivement les barres **6** et **8** et le bras **3**.

L'épaule **2** fait partie du parallélogramme $O_2O_3O_7O_6$ dont le côté O_2O_6 est solidaire de la pièce **1**.

Le bras **3** fait partie du parallélogramme $O_3O_8O_9O_{10}$ dont le côté O_9O_{10} est solidaire du poignet **4**.

La pièce repérée **7** est commune aux deux parallélogrammes.

ANNEXE 1 : CARACTERISTIQUES DU ROBOT KUKA KR 180-2 PA
--

Dimensions du robot et caractéristiques des axes

La **Figure 14, page 18** représente les axes motorisés du robot. L'entraînement est assuré par des servomoteurs brushless sans balais à faible inertie. La mesure de la position angulaire est assurée par un système de mesure absolu avec un résolveur sur chaque axe motorisé. Le frein, le réducteur et le résolveur sont intégrés dans les unités actionneurs.

La **Figure 15, page 18** définit les dimensions principales du robot ainsi que l'enveloppe de travail dont le volume est de $72,7 \text{ m}^3$.

Les tableaux ci-dessous indiquent les plages de mouvement de chaque axe par rapport à la position zéro et les caractéristiques des moteurs.

Tableau 3 : Caractéristiques des axes

Axe	Plage de mouvements	Vitesse de rotation maxi.	Accélération angulaire maxi.
A1	$-185^\circ < \alpha_1 < +185^\circ$	$105^\circ/\text{s}$	$300^\circ/\text{s}^2$
A2	$-129^\circ < \alpha_2 < 0^\circ$	$105^\circ/\text{s}$	$300^\circ/\text{s}^2$
A3	$-19^\circ < \alpha_3 < 161^\circ$	$105^\circ/\text{s}$	$300^\circ/\text{s}^2$
A4	$-350^\circ < \alpha_4 < 350^\circ$	$300^\circ/\text{s}$	$500^\circ/\text{s}^2$

Tableau 4 : Caractéristiques des moteurs

Moteur	Axe	Monté sur	Entraîne	Nmaxi ($\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$)	Puissance (kW)	Réducteur	Frein (Nm)
M1	A1	0	1	3500	4,5	200	5
M2	A2	1	2	3500	3,5	200	5
M3	A3	2	3	3500	2,5	200	5
M4	A4	4	5	3500	1,5	100	5

Charge admissible

La charge dynamique maximale admissible sur le poignet est de 180 daN.

ANNEXE 1 : CARACTERISTIQUES DU ROBOT KUKA KR 180-2 PA

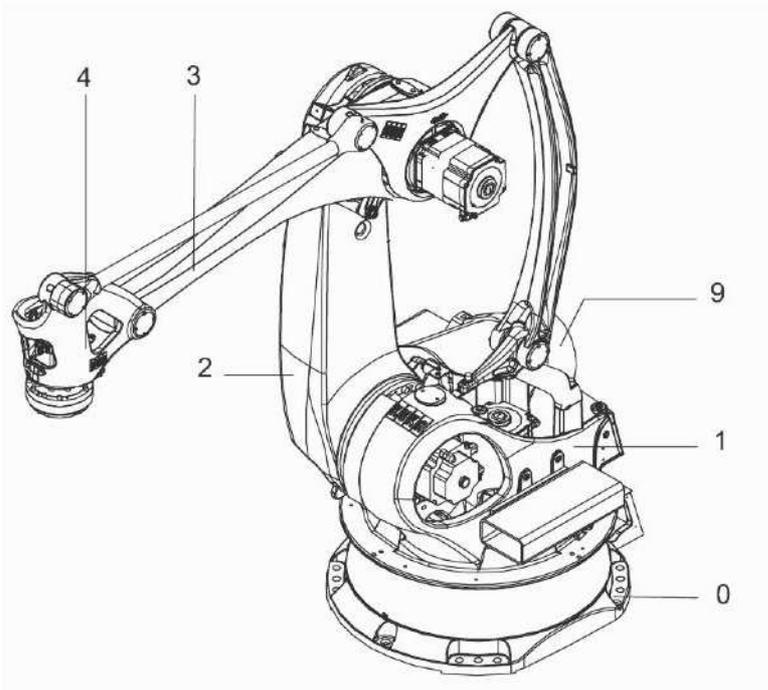


Figure 11 : Sous-ensembles principaux du robot

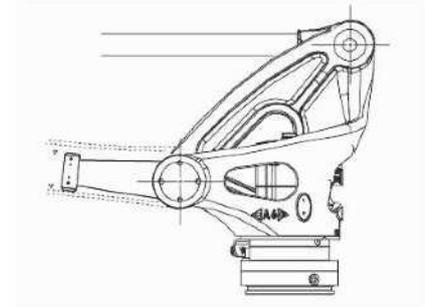


Figure 12 : Bride de fixation

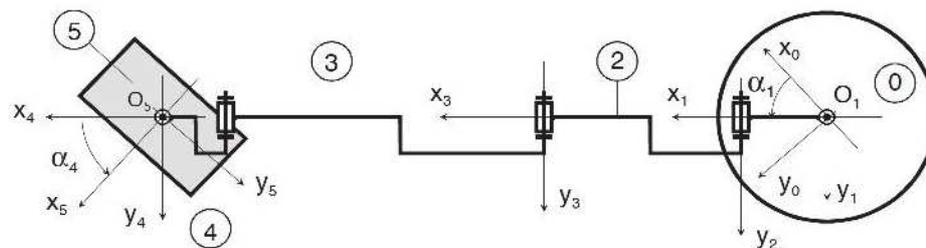
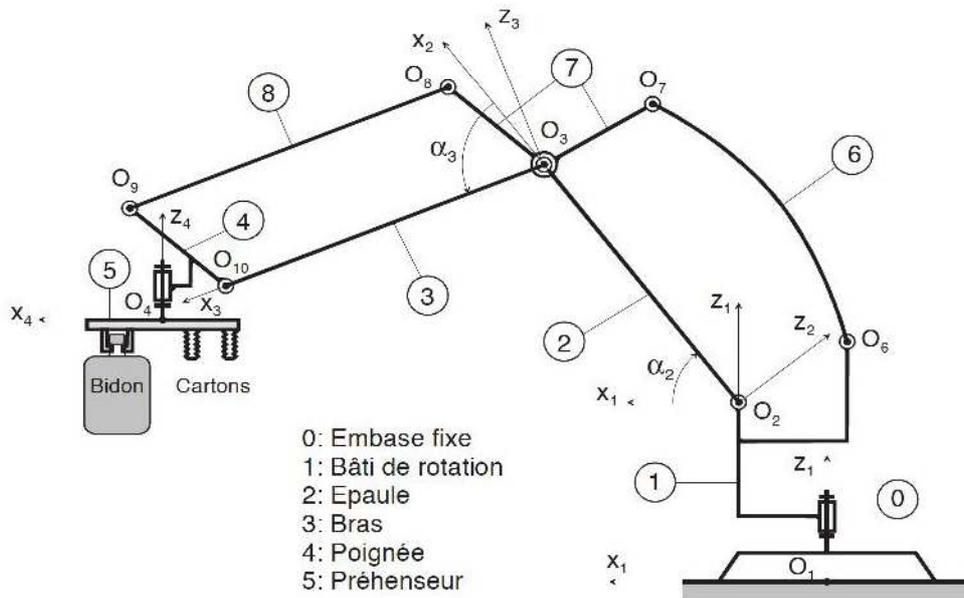


Figure 13 : Schéma cinématique du robot Kuka

ANNEXE 1 : CARACTERISTIQUES DU ROBOT KUKA KR 180-2 PA

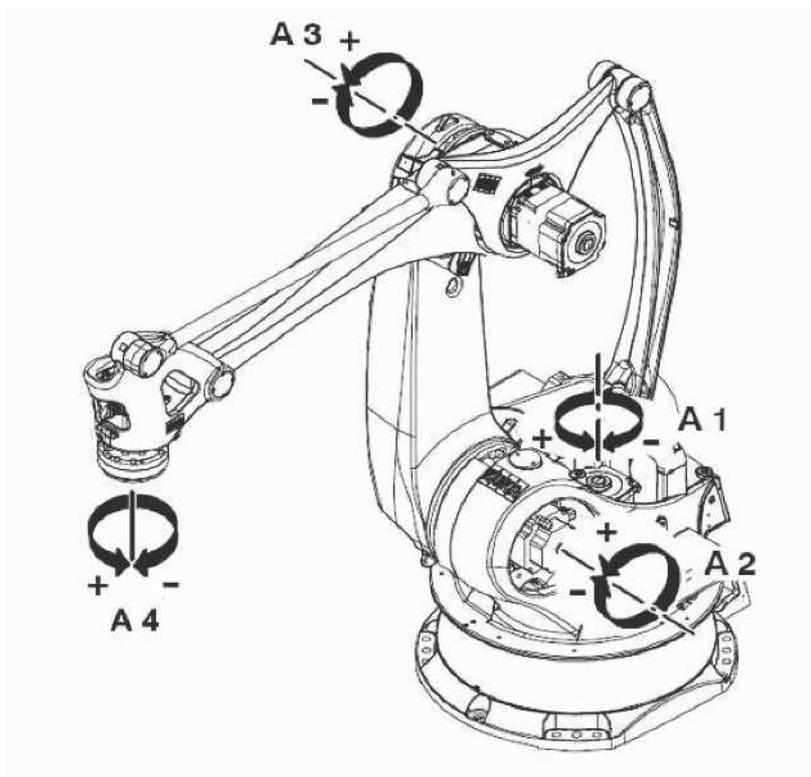


Figure 14 : Axes et sens de rotation du robot

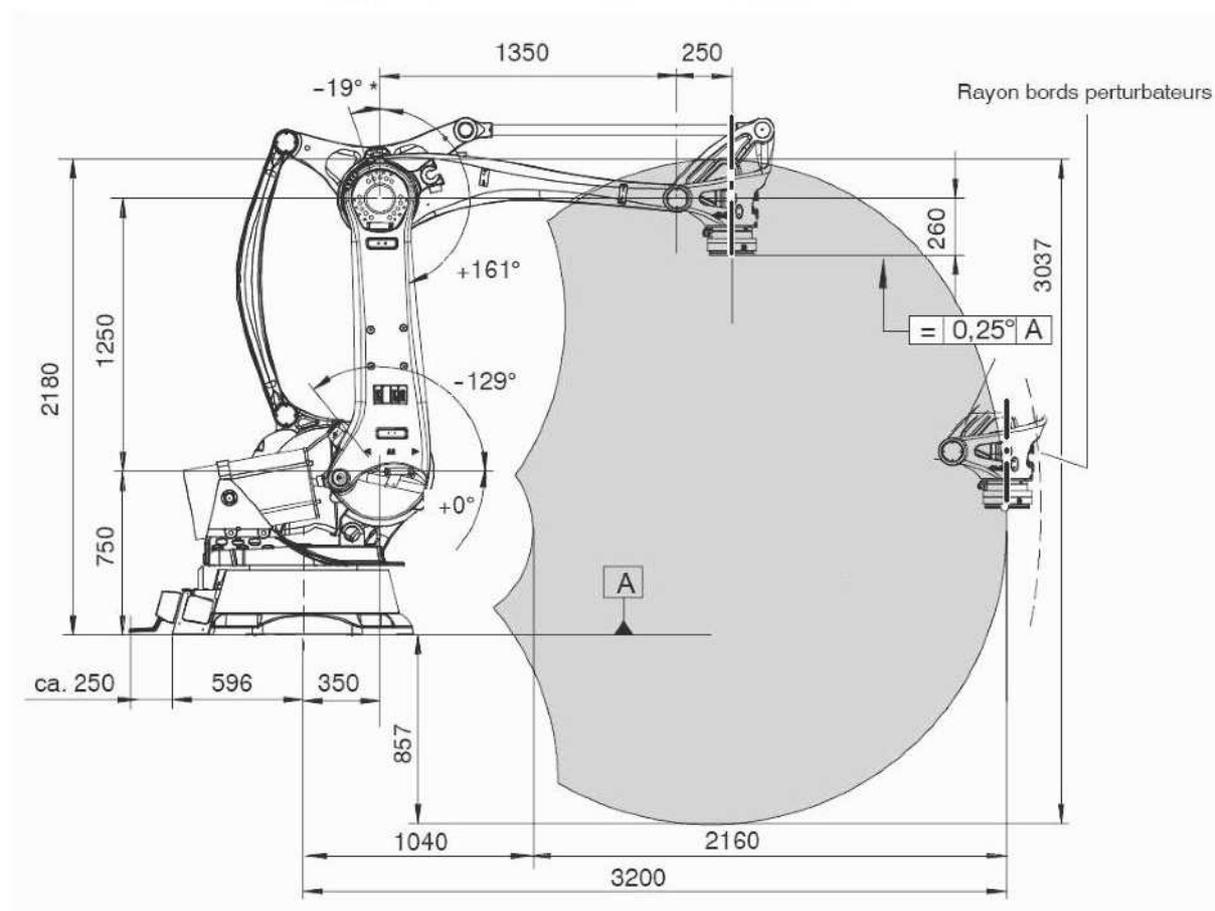


Figure 15 : Dimensions du robot Kuka KR 180-2 PA

ANNEXE 2 : GRAFCET DE FONCTIONNEMENT NORMAL DU POSTE 6

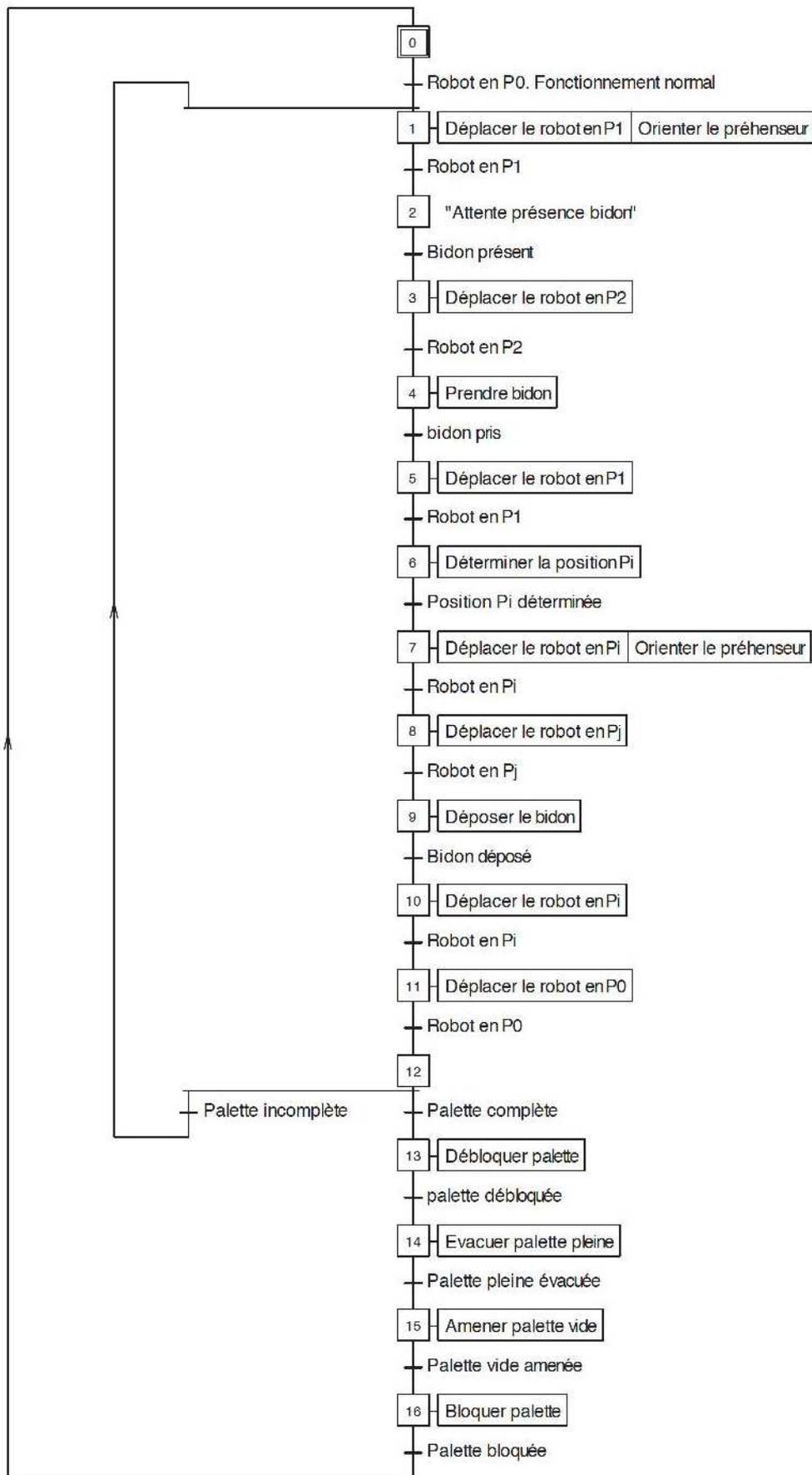
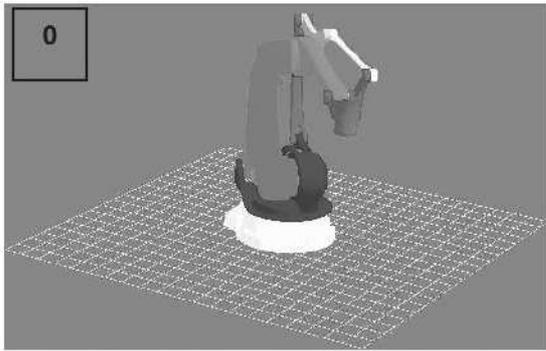
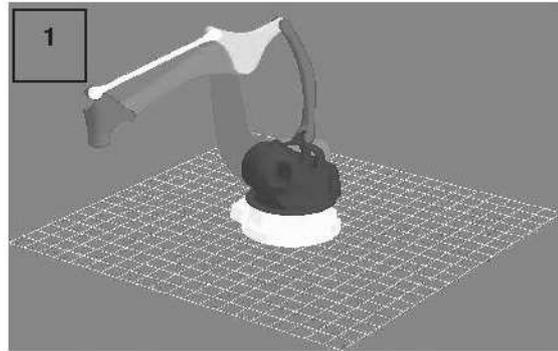


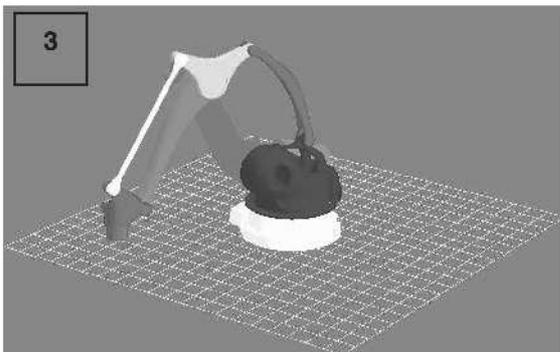
Figure 16 : Grafcet du poste 6

ANNEXE 3 : Positions atteintes par le robot lors de la dépose d'un bidon

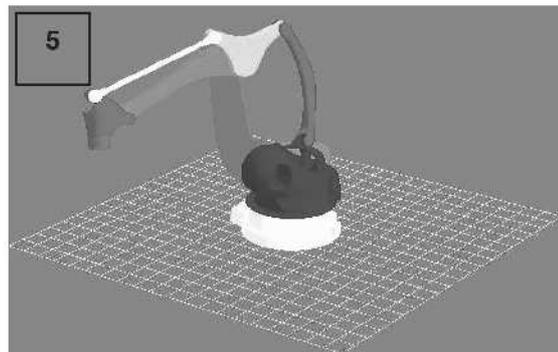
P0 : Robot en position de référence



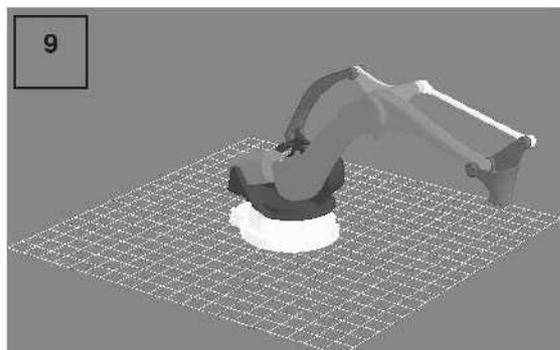
P1 : Robot au-dessus du bidon



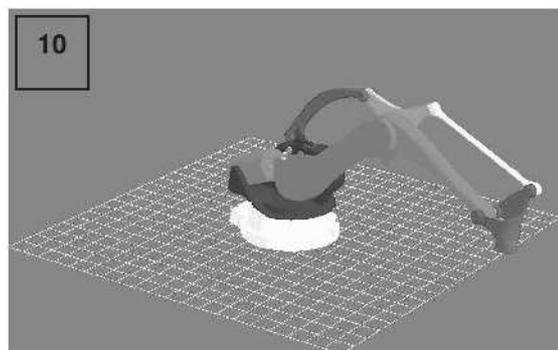
P2 : Prise bidon



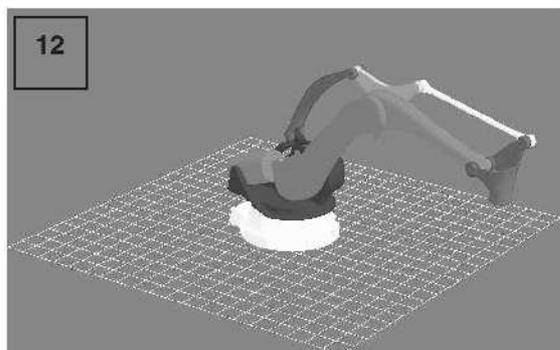
P1 : Retour en P1



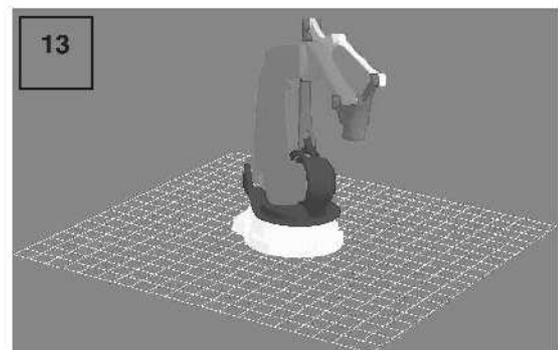
Pi : Robot au-dessus du point de dépose



Pj : Dépose du bidon



Pi : Retour en Pi



P0 : Retour en P0

Fin de l'énoncé

Document réponse DR1

Question 2.1

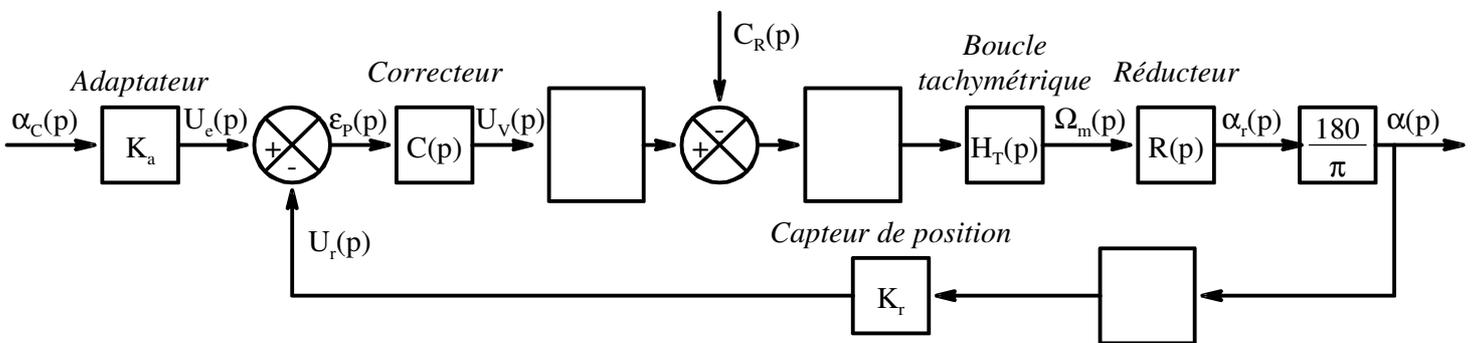
Tableau 5 : Résultats

Cas	Axe	Amplitude maximale	$d_1 = t_1$	$d_2 = t_2 - t_1$	$d_3 = d_1$	T_t
1	A1	45°	0,35	0,08	0,35	0,78
2	A1	90°				
3	A3	15°				

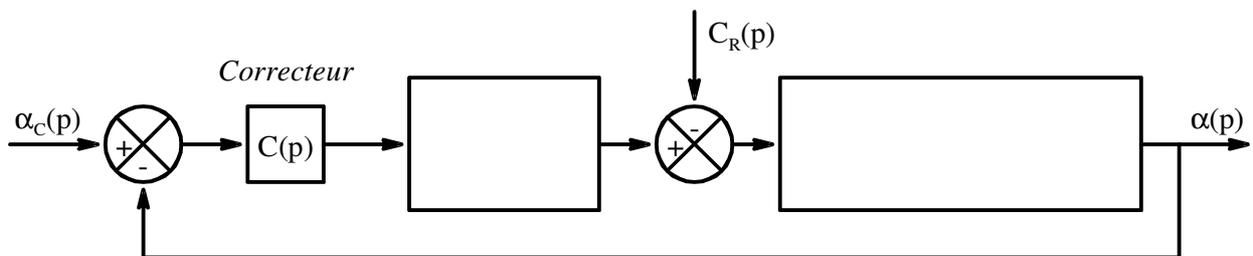
Document réponse DR2

Question 3.10

Premier schéma bloc équivalent



Deuxième schéma bloc équivalent



FTBO Non corrigée

$H_{BO}(p) =$

Document réponse DR3

Question 4.2

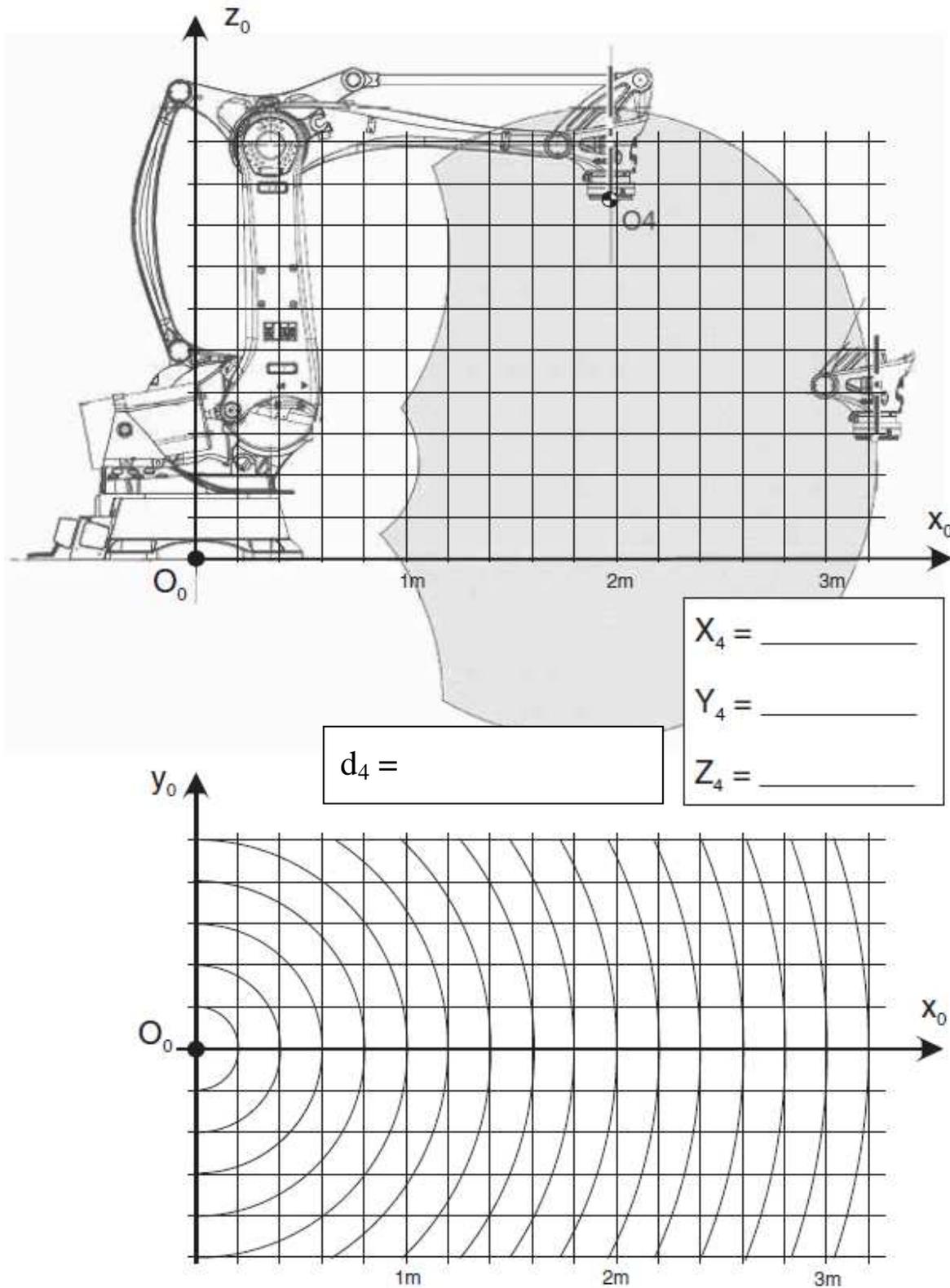


Figure 17 : Etude de l'accessibilité du robot

Conclusion