

# Unité de fabrication robotisée

Q1.1 Le convertisseur statique est un onduleur de tension à IGBT et un pont redresseur à diodes.

Q1.2  $p_m = 1$  à 50Hz

Q1.3  $\omega = \Omega$

Q1.4  $T_e = L_s/R_s = 6,42\text{ms}$   $T_m = J/f_v = 0,3\text{ms}$

Q1.5  $R_s = 1,23\Omega$   $L_s = 7,9\text{mH}$   $k_c = 0,533\text{Nm/A}$   $J = 0,191 \cdot 10^{-4} \text{kg.m}^2$  et  $f_v = 0,064 \text{Nm rad}^{-1} \text{s}$

## 1.1 ASSERVISSEMENT DE COUPLE

Q1.6 Voir DR1.1

$$\text{Q1.7 } T_q(p) = \frac{I_q(p)}{I_{q\text{ref}}(p)} = \frac{C_{Iq}}{R_s + L_s p + C_{Iq}} .$$

Q1.8 C'est un P. I.

Q1.9 On compense le pôle électrique  $\tau_{11} = L_s/R_s = 6,4 \text{ms}$  .

$$\text{Q1.10 } k_T = 1 \text{ et } \tau_T = \frac{\tau_{11} R_s}{k_{11}} = \frac{L_s}{k_{11}}$$

Q1.11  $k_{11} = 2\pi F_c L_s = 49,6$

## 1.2 ASSERVISSEMENT DE COURANT AVEC RETARD

$$\text{Q1.12 } T_{2q}(p) = \frac{k_{12}(1 + \tau_{12}p)/R_s}{\tau_{12}p \left(1 + \frac{L_s}{R_s} p\right) (1 + T_c p) + k_{12}(1 + \tau_{12}p)/R_s} .$$

Q1.13 La période d'échantillonnage étant forcément plus petite que la constante de temps du système alors  $\tau_{12} = L_s/R_s$

**Q1.14:**

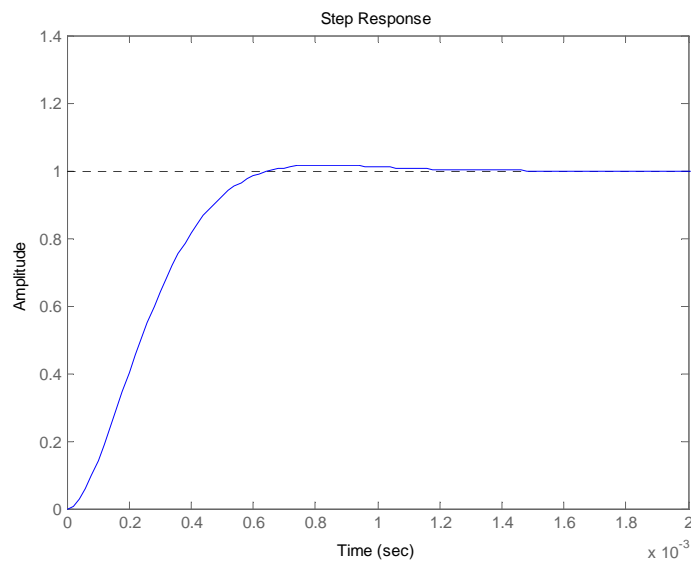
$$T_{2q}(p) = \frac{1}{1 + \frac{L_s}{k_{12}}p + \frac{L_s T_e}{k_{12}}p^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_{12}}{L_s T_e}} \text{ et } \xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_s}{k_{12} T_e}}$$

$$\text{Q1.15 } k_{12} = \frac{L_s / R_s \omega_0 R_s}{2\xi} = \frac{\omega_0 L_s}{2\xi} = \frac{L_s}{4T_e \xi^2} = \omega_0^2 L_s T_e$$

$$\text{Q1.16 } k_{12} = \omega_0^2 L_s T_e = 31,2 \quad \xi = 0,8$$

**Q1.17** Allure de la réponse indicielle de  $i_q(t)$ .



## **PARTIE 2 MODELE GEOMETRIQUE DU ROBOT**

### **2.1 NATURE DE LA CHAINE CINEMATIQUE**

**Q2.1** voir DR2.1

**Q2.2** RRPR

### **2.2 GENERALITES SUR LES PASSAGES ENTRE REPERES.**

#### **2.2.1 TRANSLATION DE COORDONNEES**

Figure 2.2 : Translation entre repères

**Q2.3**

$$\begin{cases} x_0 = T_x + x_1 \\ y_0 = T_y + y_1 \\ z_0 = T_z + z_1 \end{cases}$$

**Q2.4**  $T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}.$

#### **2.2.2 ROTATION DANS LES DIFFERENTS REPERES : ROULIS, TANGAGE, LACET**

**Q2.5**

$$\begin{cases} x_0 = x_1 \\ y_0 = \cos \theta_r y_1 - \sin \theta_r z_1 \\ z_0 = \sin \theta_r y_1 + \cos \theta_r z_1 \end{cases}$$

**et**  $k_{r11} = 1, k_{r12} = 0, k_{r13} = 0, k_{r21} = \cos \theta_r, k_{r22} = -\sin \theta_r, k_{r23} = \sin \theta_r, k_{r31} = 0, k_{r32} = \sin \theta_r$  **et**  
 $k_{r33} = \cos \theta_r$

$$\text{Q2.6 } [K_r] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ 0 & \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix},$$

$$\text{Q2.7 } [K_t] = \begin{bmatrix} \cos \theta_t & 0 & \sin \theta_t \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_t & 0 & \cos \theta_t \end{bmatrix}$$

$$\text{Q2.8 } K_l = \begin{bmatrix} \cos \theta_l & -\sin \theta_l & 0 \\ \sin \theta_l & \cos \theta_l & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 2.2.3 DEFINITION D'UN CHANGEMENT COMPLET DE REPERE ROTATION + TRANSLATION

### 2.2.4 DEFINITION DE LA MATRICE DENAVIT-HARTENBERG

$$\text{Q2.9 La translation : } DH_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{La rotation selon x : } DH_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_r & -\sin \theta_r & 0 \\ 0 & \sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{La rotation selon y : } DH_t = \begin{bmatrix} \cos \theta_t & 0 & \sin \theta_t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_t & 0 & \cos \theta_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

et la rotation selon z :  $DH_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

### Q2.10

$$\begin{aligned}
 DH &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & a_i \sin \theta_i \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

## 2.2.5 CAS DU ROBOT SCARA

### Q2.11 342mm

Q2.12 On opère une translation de  $d_1$  selon z et une rotation de  $\theta_1$  autour de z

$$DH_{01} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Q2.13 Lors du changement de repère, on effectue une translation selon l'axe x de  $a_2$  et une rotation autour de l'axe z de  $\theta_2$  donc :

$$DH_{12} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q2.14} \quad DH_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**Q2.15**  $a_2=0,275$ ,  $a_1=0,325$ ,  $d_1=0,342$ ,  $d_3= -0,165$  ;

$$DH_{03} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & 0 & 0,195 \\ \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & 0 & 0,519 \\ 0 & 0 & 1 & 0,177 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## 2.2.6 MODELE INVERSE

**Q2.16** voir DR2.2

**Q2.17** Il en existe une infinité, il s'agit de venir au niveau des maximums autorisés par le robot. Exemple :  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=0^\circ$ ,  $d_3=-165\text{mm}$  ou  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=90^\circ$ ,  $d_3=-165\text{mm}$  ...

## **PARTIE 3 CONTROLE DYNAMIQUE DU ROBOT**

### **3.1 CONTROLE EN POSITION DU PREMIER AXE DU ROBOT**

#### **3.1.1 CONTROLE SANS INFLUENCE DE $\theta_2$**

**Q3.1**

$$\begin{aligned} H(p) = \frac{\theta_1(p)}{T_1(p)} &= \frac{1}{p \left( \left[ \left( \frac{m_1}{3} + m_2 + m_3 \right) d_1^2 + \left( \frac{m_2}{3} + m_3 \right) d_2^2 \right] p + F_v \right)} \\ &= \frac{1 / F_v}{p \left( \left[ \left( \frac{m_1}{3} + m_2 + m_3 \right) d_1^2 + \left( \frac{m_2}{3} + m_3 \right) d_2^2 \right] / F_v p + 1 \right)} \end{aligned}$$

$$\mathbf{k_1 = 1 / F_v \text{ et } \tau_s = \left[ \left( \frac{m_1}{3} + m_2 + m_3 \right) d_1^2 + \left( \frac{m_2}{3} + m_3 \right) d_2^2 \right] / F_v}$$

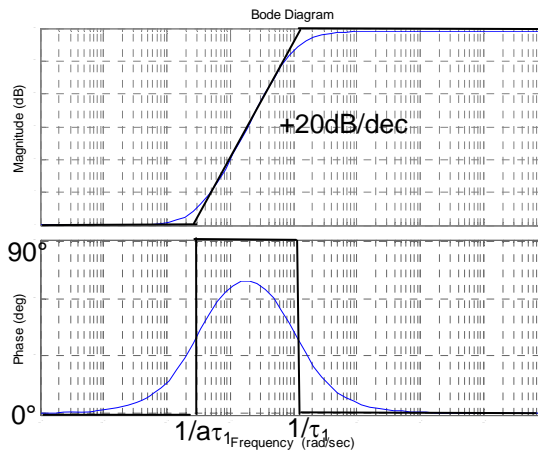
**Q3.2  $k_1 = 1,43$   $\tau_s = 4,6$  s**

**Q3.3 voir DR3.1.**

**Q3.4 La marge de phase est de  $22,1^\circ$  et est insuffisant vis-à-vis des simplifications effectuées (linéarisation).**

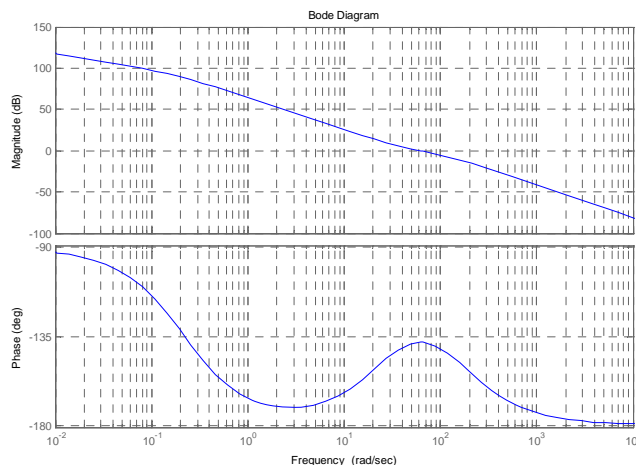
**Q3.5  $a > 1$**

**Q3.6 Le déphasage maximal est obtenu pour  $\omega_m = \frac{1}{\tau_1 \sqrt{a}}$  et vaut  $\sin \varphi_m = \frac{a-1}{a+1}$**



Q3.7 Il faut obtenir  $42^\circ$ , comme  $a = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m}$ , nous obtenons  $a=5$ .

Q3.8 Le maximum est obtenu pour  $\omega_m = \frac{1}{\tau_1 \sqrt{a}}$  donc  $\tau_1=7,1\text{ms}$  et  $K_p=5623$ . on obtient alors le Bode suivant :



Q3.9 L'erreur statique vaut  $\varepsilon_s = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \varepsilon(p) = 0$  pour  $e(p)=1/p$  et l'erreur de trainage vaut

$$\varepsilon_t = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \varepsilon(p) = \frac{1}{k_1 K_p} \text{ pour } e(p)=1/p^2$$

### 3.1.2 CONTROLE EN TENANT COMPTE DE $\theta_2$

Q3.10 L'évolution de  $\theta_2$  agira sur la constante de temps du système

Q3.11  $\theta_2$  varie entre  $[-150^\circ, 150^\circ]$  et  $\cos(\theta_2)$  varie entre  $[-0,87, 1]$ .

Q3.12  $\tau_s$  varie de 2,36 s à 7,2s.

**Q3.13** La variation de marge de phase est de 39° à 41°

**Q3.14** Lors du positionnement de  $\theta_1$  on dispose de la mesure de  $\theta_2$ . En effet, le modèle inverse donne toutes les positions pour placer un objet correctement.

Afin de tenir compte des variations de  $\theta_2$ , il suffit de faire varier  $a$  en fonction de  $\theta_2$ . Le correcteur sera paramétré en fonction de  $\theta_2$ . C'est un correcteur à paramètre variant dans le temps.

### 3.1.3 IMPLANTATION DU CONTROLEUR

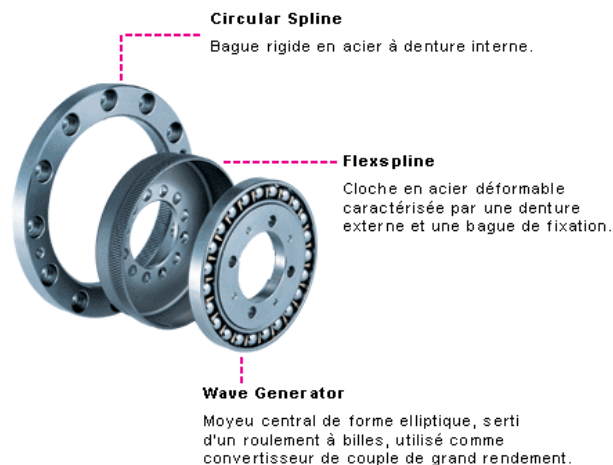
$$\text{Q3.15} \quad C_a(z) = K_p \frac{1 + \frac{2a\tau_1}{Te} z - \frac{2a\tau_1 - 1}{Te}}{1 + \frac{2\tau_1}{Te} z - \frac{2\tau_1 - 1}{Te}} \quad \text{Donc} \quad k_z = K_p \frac{1 + \frac{2a\tau_1}{Te}}{1 + \frac{2\tau_1}{Te}}, \quad c_{1z} = \frac{\frac{2a\tau_1 - 1}{Te}}{1 + \frac{2a\tau_1}{Te}}$$

$$\text{et } c_{2z} = \frac{\frac{2\tau_1 - 1}{Te}}{1 + \frac{2\tau_1}{Te}}$$

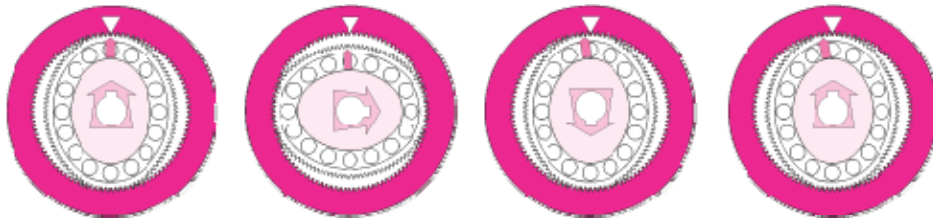
**Q3.16**  $k_z = 26635$ ,  $c_{1z} = 0,97$  et  $c_{2z} = 0,86$ .

**Q3.17** La nouvelle valeur de  $k_z$  est égale à  $k_z \frac{1}{3,82 * 360 * 80} = 0,242$

**Q3.18**



Le Flexspline a un diamètre primitif légèrement inférieur à celui du Circular Spline et a deux dents en moins. Il est déformé par le Wave Generator elliptique et engène la denture du Circular Spline par le grand axe de l'ellipse.



Dès que le Wave Generator est entraîné, la zone d'engrènement se déplace avec le grand axe de l'ellipse.

Une rotation de 180° du Wave Generator entraîne un déplacement relatif d'une dent entre le Flexspline et le Circular Spline.

A chaque rotation complète du Wave Generator, le Flexspline se déplace par rapport au Circular Spline de 2 dents dans le sens opposé.

#### **Les avantages sont :**

##### **-Précision de positionnement et répétabilité excellentes**

Les réducteurs Harmonic Drive permettent une précision de positionnement inférieure à une minute d'arc et une répétabilité de quelques secondes d'arc.

##### **-Grande capacité de couple**

Le couple est transmis par de multiples engagements de denture. Ainsi, le réducteur Harmonic Drive offre une capacité de couple égale à celle offerte par des réducteurs deux fois plus grands et trois fois plus lourds.

##### **-Jeu angulaire nul**

Grâce à une pré-charge naturelle dans l'engagement des dents du réducteur Harmonic Drive, il n'y a pas de jeu angulaire.

##### **-Un grand rapport de réduction en un seul étage**

Avec 3 éléments de base, on peut atteindre des rapports de réduction allant de 50:1 à 320:1.

##### **-Un rendement élevé**

En fonctionnement, on peut atteindre un rendement de 85%. (chiffres basés sur des tests réels).

##### **-Usure minimale, Longue durée de vie**

Dans les réducteurs Harmonic Drive, les dents viennent en contact par des mouvements radiaux à une vitesse de glissement nulle, même à grande vitesse en entrée. Les frictions interdentures et les usures sont négligeables.

##### **-Grande raideur torsionnelle**

Les réducteurs Harmonic Drive montrent une importante raideur torsionnelle quelle que soit leur vitesse de fonctionnement. Cette raideur presque linéaire garantit des caractéristiques de fonctionnement optimum.

##### **-Réversibilité**

Les réducteurs Harmonic Drive sont réversibles et peuvent donc être utilisés en multiplicateurs.

Les réducteurs Harmonic Drive présentent un arbre creux de grandes dimensions permettant le passage d'arbres de transmission, de câbles ou de faisceaux lasers coaxialement à l'axe de rotation. Les coûts d'études et de développement sont donc considérablement réduits.

**Q3.19 L'action d'anticipation de la vitesse (feedforward) est utilisée surtout dans des systèmes à fort frottement visqueux. Elle permet de « booster » le système. Par contre, elle peut déstabiliser le système et créer de gros dépassements.**

**L'action d'anticipation d'accélération permet de compenser les masses importantes dans les systèmes à faible friction.**

## 3.2 MODELISATION COMPLETE DU ROBOT

### 3.2.1 REPRESENTATION D'ETAT

#### Q3.20

$$b_1 = 1, b_2 = 1, b_3 = 1, m_{11} = (i_1 + 2i_2 C_2 + i_3), m_{12} = (i_2 C_2 + i_3), m_{21} = (i_2 C_2 + i_3), m_{22} = i_3 \text{ et } m_{33} = m_3$$

### 3.2.2 LINEARISATION DU MODELE ET DECOUPLAGE DES AXES

$$\text{Q3.21 } \frac{q}{T^*} = H^*(p) = \frac{1}{p^2}$$

Nous avons donc montré, que dans ce cas, le système en boucle fermée est linéaire. Le correcteur sera plus facile à déterminer.

## 3.3 ETUDE DE LA GENERATION DE TRAJECTOIRE

$$\text{Q3.22 } t_1 = \frac{A_{\max}}{\Delta A}$$

$$\text{Q3.23 } t_2 = \frac{V_{\max}}{A_{\max}}$$

$$\text{Q3.24 } t_3 = t_1 + t_2 = \frac{A_{\max}}{\Delta A} + \frac{V_{\max}}{A_{\max}}$$

$$\text{Q3.25 } d_{\text{int}} = \frac{A_{\max}^3}{3\Delta A^2} + \frac{1}{2} A_{\max} \left( \frac{V_{\max}}{A_{\max}} - \frac{A_{\max}}{\Delta A} \right)^2$$

$$\text{Q3.26 } T_c = \frac{d_f - 2d_{\text{int}}}{V_{\max}} + 2 \left( \frac{A_{\max}}{\Delta A} + \frac{V_{\max}}{A_{\max}} \right)$$

$$\text{Q3.27 } T_c = 0,61 \text{ s}$$

$$\text{Q3.28 } T_{c \min} = \left( \frac{96d_f}{\Delta A} \right)^{1/3} .$$

## PARTIE 4 TRAITEMENT D'IMAGES ET COMMUNICATION ETHERNET

**Q4.1** CCD signifie *Charge-Coupled Device*

**Q4.2**  $G_x = 800$  et  $G_y = 800$

### **4.1 TRAITEMENT D'IMAGES**

**Q4.3** voir DR4.2.

**Q4.4** voir DR4.3.

**Q4.5** voir D.R.4.4.

**Q4.6** Afin de calculer la surface du gâteau, il suffit de détecter le contour avec l'image après seuillage et de mettre les pixels à 255 dans la zone ainsi délimitée. Ensuite il faut compter le nombre de pixels à 255.

**Q4.7** Sur la surface : 
$$X_G = \frac{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^5 I_{i,j} X_i}{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^5 I_{i,j}} = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^5 \frac{I_{i,j}}{255} X_i \text{ et}$$

$$Y_G = \frac{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^5 I_{i,j} Y_i}{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^5 I_{i,j}} = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^5 \frac{I_{i,j}}{255} Y_i$$

**Q4.8** la position du barycentre est  $x_G = 4,5$        $y_G = 4$

### **4.2 RESEAU ETHERNET**

**Q4.9 Concentrateur (Hub)** : au niveau de la couche physique, régénère le signal (sur plusieurs brins).

**Pont (Bridge)** : au niveau de la couche liaison, relie deux réseaux en triant les adresses physiques (adresse MAC) (et permet donc de découper un domaine de collision). Il permet de diriger les données uniquement vers la machine destinataire (pont filtrant).

**Commutateur (Switch)** : couche liaison, relie plusieurs réseaux, apprend dynamiquement les adresses physiques (MAC). Il permet de diriger les données uniquement vers la machine destinataire.

**Q4.10 Un commutateur une voie réseau externe+ sept voies (alimentation de chaque robots+supervision). 1switch 1 voie réseau (vers commutateur précédant)+ deux voies (1 commande Robots + 1camera) par armoire 2 robots. Au total, 1 commutateur 8 ports et 6 commutateurs 3 ports sont nécessaires.**

**Q4.11 Les connecteurs sont des RJ45 (et ST/BNC)**

**Q4.12 Il faut un câble catégorie 5, classe D et Fibre optique multimode/coaxial**

**Q4.13 De 192.168.0.10 à 192.168.0.15, de 192.168.0.20 à 192.168.0.25, 192.168.0.1 pour l'automate, 192.168.0.05 pour la supervision et 192.168.0.50 pour la console de programmation.**

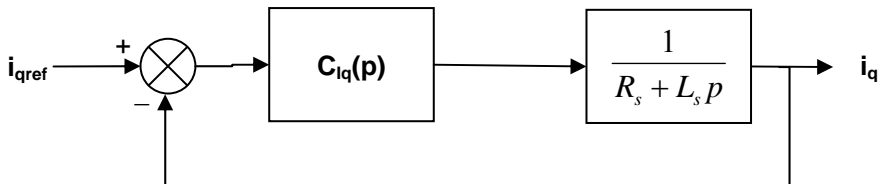
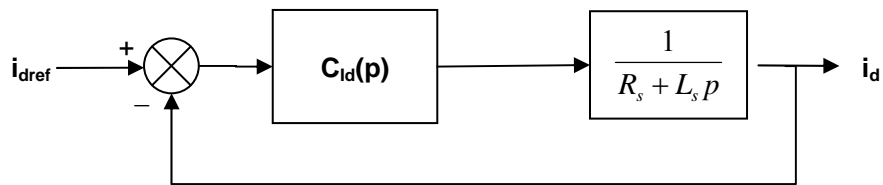
**Q4.14 C'est un réseau de classe C et de classe privée.**

**Q4.15 Un masque de réseau/sous-réseau est un masque indiquant le nombre de bits utilisés pour identifier le réseau/sous-réseau, et le nombre de bits caractérisant les hôtes (ce qui indique aussi le nombre d'hôtes possibles dans ce sous-réseau). Les masques de réseau/sous-réseau utilisent la même représentation que celles des adresses.**

**Q4.16 255.255.255.192**

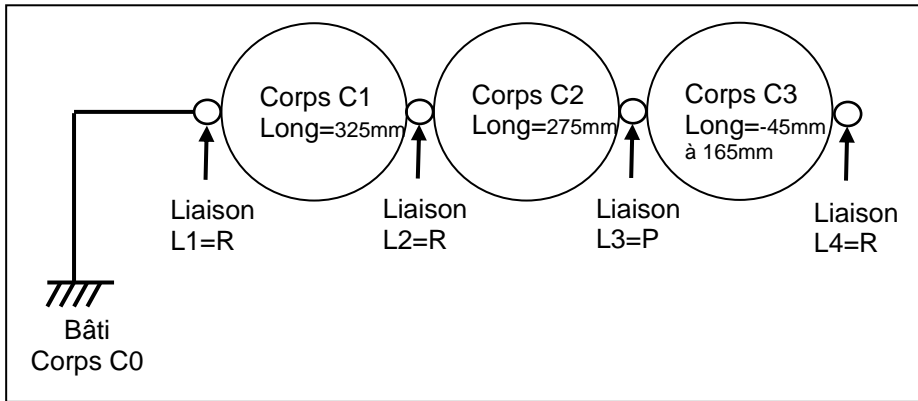
# Document réponse partie 1

D.R. 1.1 : Schémas blocs du contrôle vectoriel de  $i_d$  et de  $i_q$

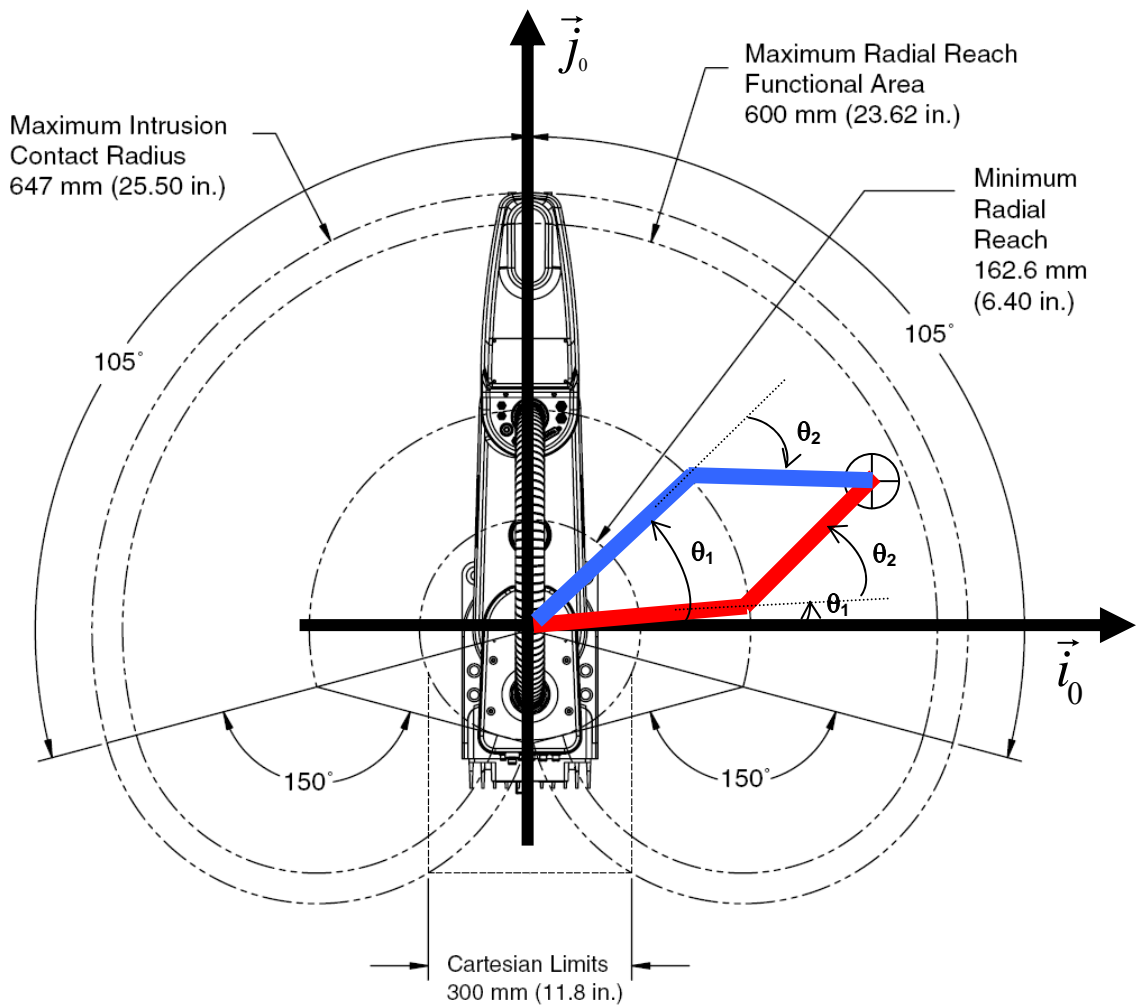


## Documents réponses partie 2

### D.R. 2.1 : Chaîne cinématique du bras manipulateur SCARA

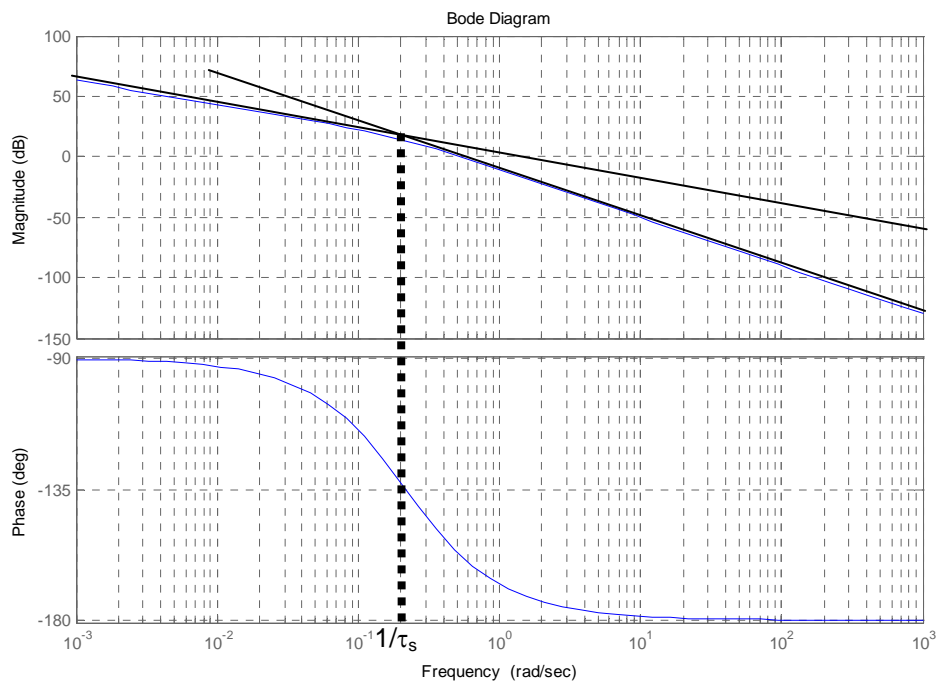


### D.R. 2.2 : Modèle inverse du robot SCARA $\theta_1$



# Document réponse partie 3

## D.R. 3.1 : Diagramme de Bode de la boucle ouverte H(p)



## Documents réponses partie 4

D.R.4.1: Image originale en niveau de gris

$I(x,y)$	1	2	3	4	5	6	7	x	
1	1	2	5	6	6	7	2		
2	4	9	70	74	65	9	3		
3	2	66	245	250	235	65	5		
4	6	55	249	255	242	52	7		
5	5	11	101	140	140	8	4		
y									

D.R.4.2: Image traitée par gradient en X

$I_{gx}(x,y)$	1	2	3	4	5	6	7	x	
1	1	1	3	1	0	1	-5		
2	4	5	61	4	-9	-56	-6		
3	2	64	179	5	-15	-170	-60		
4	6	49	194	6	-13	-190	-45		
5	5	6	90	39	0	-132	-4		
y									

D.R.4.3: Image traitée par gradient en Y

$I_{gy}(x,y)$	1	2	3	4	5	6	7	x	
1	1	2	5	6	6	7	2		
2	3	7	65	68	59	2	1		
3	-2	57	175	176	170	56	2		
4	4	-11	4	5	7	-13	2		
5	-1	-44	-148	-115	-102	-44	-3		
y									

D.R.4.4: Décision de contour

$S(x,y)$	1	2	3	4	5	6	7	x	
1	0	0	0	0	0	0	0		
2	0	0	0	0	0	0	0		
3	0	0	255	255	255	255	0		
4	0	0	255	0	0	255	0		
5	0	0	255	255	255	255	0		
y									