

# Automatique et informatique industrielle

## Éléments de corrigé

### Système de dépose de gel

#### Partie A1 : Dimensionnement du système de convoyage

Cette partie s'intéresse au dimensionnement du nombre de palettes sur le convoyeur et aux choix des moteurs pour son entraînement.

**QA1-1** Si on fait l'hypothèse d'une production de 800 articles par heure, alors il faut introduire une pièce toutes les 4,5 s. Pendant ce temps le convoyeur doit parcourir la distance correspondant à l'espace entre deux palettes.

$$\text{D'où : } V_{\text{moy}} = \frac{0,140}{4,5} = 0,031 \text{ m/s}$$

**QA1-2** Pour des raisons d'ergonomie l'opérateur positionne l'article sur la palette dans un mouvement du haut vers le bas (le mouvement de poussée est plus fatigant). En plus, il ajuste l'endroit où le gel doit être déposé à l'aide d'un gabarit en regardant l'article qui se trouve face à lui. Si l'on fait un simple basculement, l'endroit où le gel doit être déposé se trouvera en dessous. Ce qui ne permet pas au robot de déposer le gel par gravitation. Il est donc nécessaire de faire un retournement pour que l'endroit où le gel doit être déposé se retrouve au dessus de la pièce.

**QA1-3** Entre le dépôt du gel et l'enlèvement des articles, il doit s'écouler 240 s. Si on considère que  $V_{\text{moy}} = 0,031 \text{ m/s}$ , la palette doit parcourir 7,2 m avant de pouvoir retirer l'article.

Le nombre X de palettes que l'on peut mettre sur 7,2 m, espacées de 0,14 m est de  $7,2/0,14$  soit 54 palettes.

Le nombre de palettes doit être égal à  $54+4+4+4+2+4+2+4+2+4 = 84$  palettes.

Comme il faut prendre un multiple de 4, nous choisissons 84 palettes.

**QA1-4** La longueur totale du convoyeur est donc de  $84 \times 0,14 = 11,76 \text{ m}$

**QA1-5** On produit 800 articles par heure et on veut que le chargement se fasse par lot de 4 articles. Il y a donc 200 chargements et 200 avances par heure.

Le temps restant pour les 200 chargements est de  $3600 - 200 \times 3 = 3000 \text{ s}$ .

On en déduit que le temps de chaque chargement doit être égal à 15 s.

**QA1-6** En général, la limitation de l'accélération permet de limiter les chocs mécaniques ce qui permet de préserver le système. Dans notre cas, elle a aussi pour effet de ne pas causer l'étalement du gel non encore solidifié.

On considère que le déplacement durant les 3s vaut  $4 \times 0,14 = 0,56 \text{ m}$

$$\begin{cases} ta=3s=t_1+t_2+t_3=2.t_1+t_3 \\ xa=0,56=x_1+x_2+x_3 \end{cases} \text{ soit } \begin{cases} ta=3s=2 \frac{V_{\text{max}}}{a} + t_2 \\ xa=0,56 = \frac{V_{\text{max}}^2}{a} + V_{\text{max}} \cdot t_2 \end{cases}$$

$$\text{d'où } \begin{cases} t_2 = 2,12 \text{ s} \\ V_{\max} = 0,218 \text{ m/s} \end{cases}$$

Finalement,  $t_1 = t_3 = t_a - t_2 = (3 - 2,228)/2 = 0,44 \text{ s}$ .

**QA1-7** on a :  $V_{\max} = R_p \cdot \omega_{\text{poulie}}$  avec  $V_{\max}$  la vitesse maximale déterminée dans la question QA1-6.

donc  $\omega_{\text{poulie}} = V_{\max} / R_p$

On en déduit :

$$K = \omega_{\text{poulie}} / \omega_{\text{moteur}} = V_{\max} / (R_p \omega_{\text{moteur}})$$

$$= 0,218 \times 60 / (0,1755 \times 2 \times 3,1416 \times 2000) = 0,00596$$

**QA1-8** En écrivant l'énergie cinétique du convoyeur nous obtenons :

$$E_{c \text{ convoyeur}} = \frac{1}{2} J_r \cdot \omega_{\text{Poulie}}^2 = \frac{1}{2} J_r \cdot K^2 \cdot \omega_{\text{moteur}}^2$$

On en déduit que le moment d'inertie du convoyeur ramené à l'axe moteur est  $J_{rm} = J_r \cdot K^2$

$$J_{rm} = 500 \times 0,0053^2 = 0,0177 \text{ kg.m}^2$$

**QA1-9** En première approche on cherche à déterminer le couple moteur nécessaire au déplacement de l'ensemble du convoyeur et l'inertie  $J_m$  des axes moteur ne sera pas prise en compte.

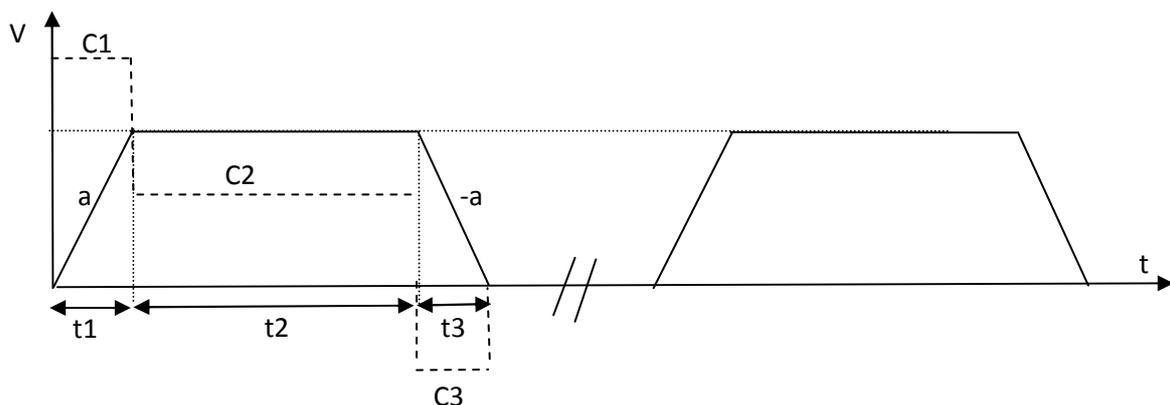
Le théorème du moment d'inertie appliqué au système donne :

$$C_m = C_f + (2 \cdot J_m + J_r K^2) \dot{\omega}_{\text{moteur}}$$

$C_m$  étant le couple électromécanique global à fournir par les deux moteurs.

Phase	Durée	Vitesse arbre moteur	Accélération arbre moteur	Couple électromécanique
1	0,44 s	.....	474,83 rad/s <sup>2</sup>	13,49 N.m
2	2,12 s	209,44 rad/s	0	5 N.m
3	0,44 s	.....	-474,83 rad/s <sup>2</sup>	-3,50 N.m
4	15 s	0 rad/s	0 rad/s <sup>2</sup>	0 N.m

**QA1-10**



**QA1-11** Le couple thermique équivalent pour l'ensemble du cycle sur chaque moteur est :

$$C_{th} = \sqrt{\frac{(6,75^2 \times 0,44 + 2,5^2 \times 2,12 + 1,75^2 \times 0,44)}{18}} = 1,38 \text{ N.m}$$

**QA1-12** Toutes les références possédant une vitesse maximale supérieure à

2000 tr/min conviennent.

On peut choisir a priori le LS 620 EV ou le LS 820 EQ.

On retiendra le LS 820EQ plus performant en couple.

**QA1-13** Les caractéristiques du LS 820 EQ sont :  $C_m = 25 \text{ N.m}$  ,  $C_{th} = 13,5 \text{ N.m}$  ,

constante de temps thermique =  $25 \times 60 = 1500 \text{ s}$ ,

5% de 1500 s = 75 s,  $t_{cycle} < 75 \text{ s}$ .

Par ailleurs l'inertie de chaque rotor est de  $380 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$ .

Le couple électromécanique global à fournir par les deux moteurs devient :

$$C_m = 5 + (2 \times 380 \times 10^{-5} + 177 \times 10^{-4} \times (596 \times 10^{-5})^2) \times 474,83 = 8,6 \text{ N.m}$$

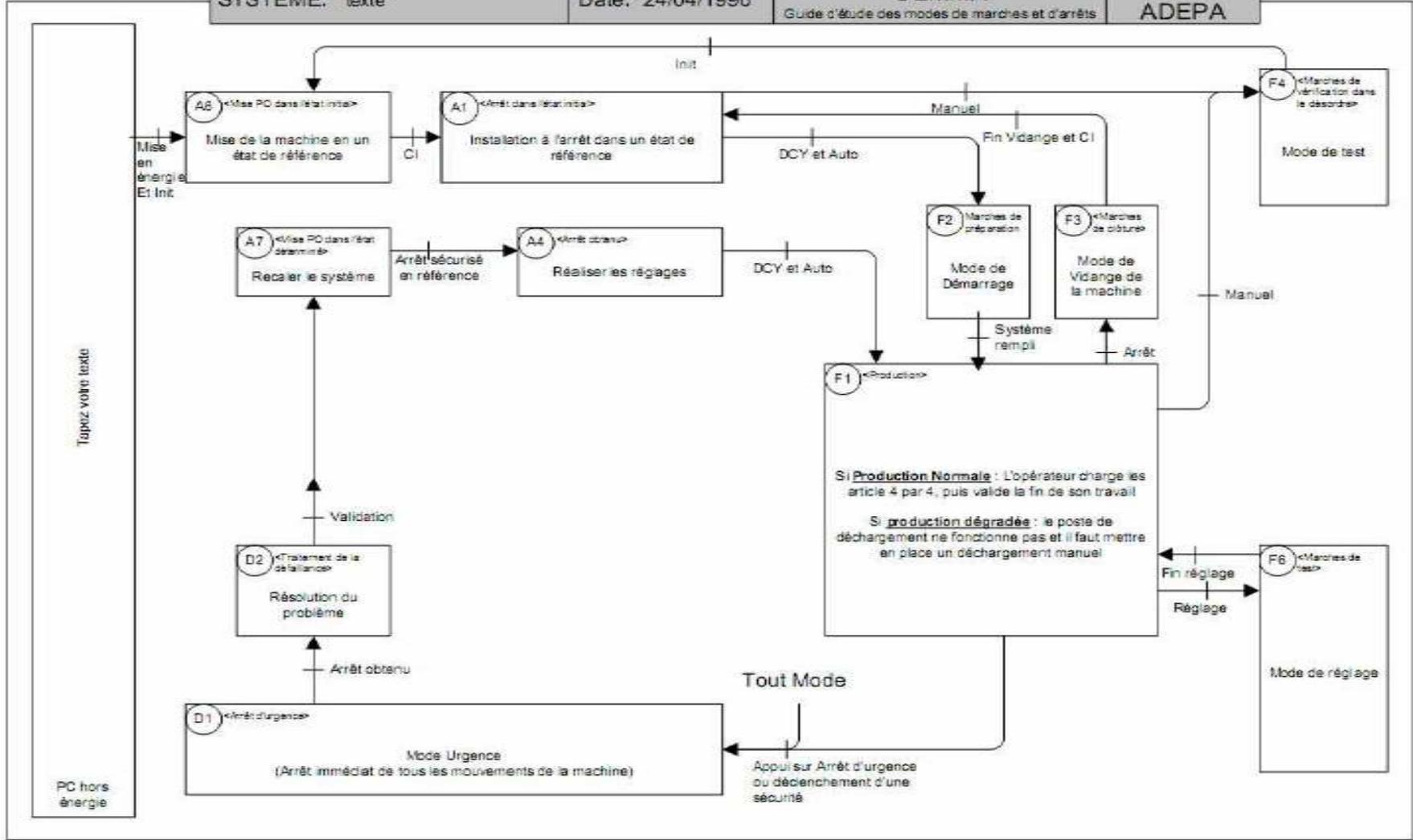
Le moteur choisi convient.

## Partie A2 : Commande du système de convoyage

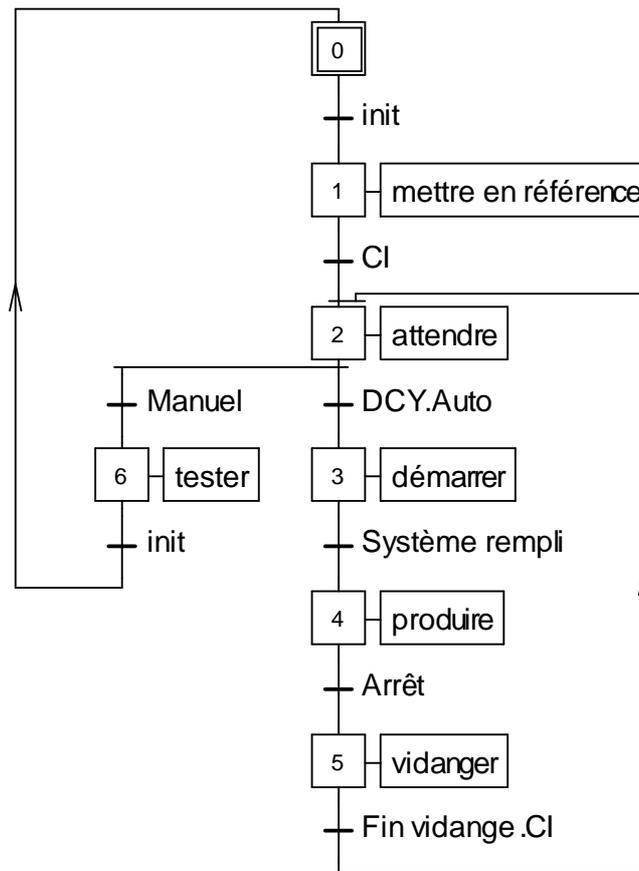
Cette partie s'intéresse à certains aspects de la commande du système de convoyage.

**QA2-1** Le cahier des charges donné dans l'énoncé décrit les différents modes de fonctionnement d'une manière littérale. On peut considérer que chaque mode correspond à un état du système. La méthode de spécification la plus appropriée et la grille GEMMA. Mais d'autres outils graphiques de modélisations peuvent aussi être utilisés comme les digrammes d'activités d'UML, les diagrammes SADT, un logigramme ou même directement l'outil grafcet ou réseau de Petri.

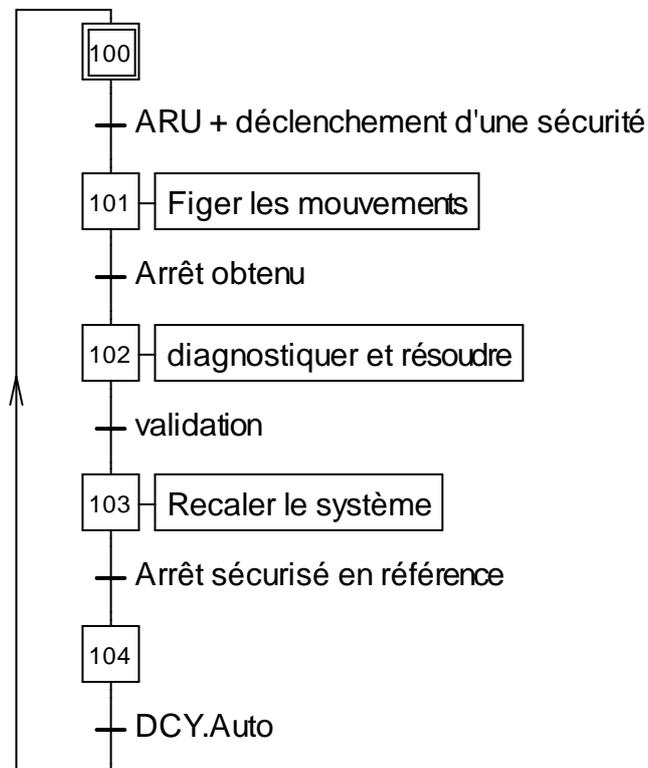
**QA2-2** Une proposition est faite à partir d'une grille Gemma. La solution n'est pas unique. Le mode de maintenance est traité en même temps que le mode d'arrêt d'urgence.



**QA2-3** Une proposition avec deux grafquets est faite. Le grafquet d'arrêt d'urgence hiérarchiquement supérieur traite aussi le mode de maintenance.

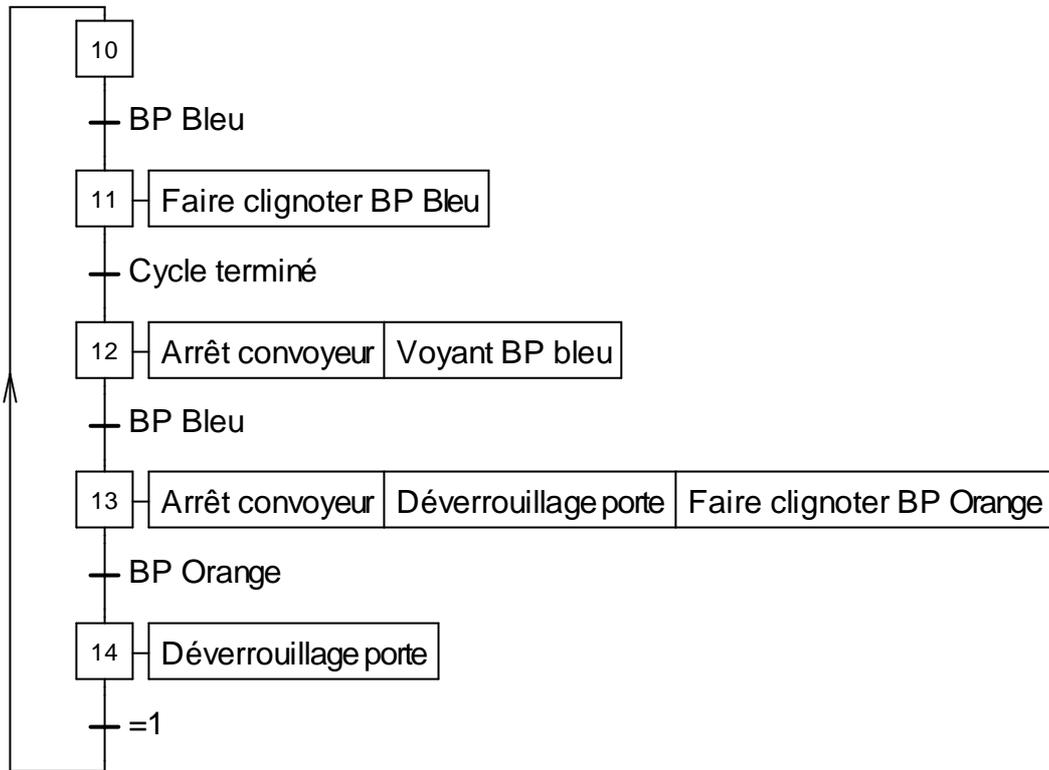


Grafcet de conduite



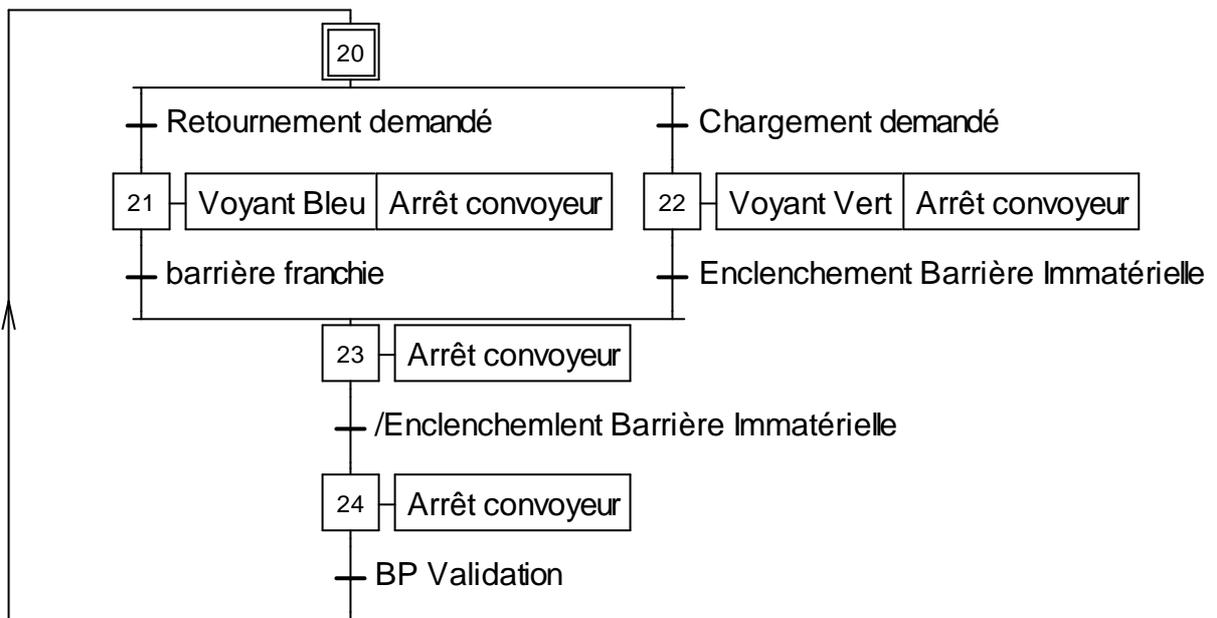
Grafcet d'arrêt d'urgence

QA2-4



QA2-5 Les principales technologies sont basées sur la détection d'un faisceau laser. Si un objet s'introduit dans la zone protégée, le faisceau est coupé et la sécurité est déclenchée.

QA2-6



L'information « Enclenchement Barrière Immatérielle » traduit le franchissement de la barrière.

**QA2-7** La traduction en logique à contact peut se faire selon plusieurs méthodes. La réponse doit montrer la bonne compréhension de la notion d'état et être une traduction qui respecte les 3 règles de Grafset.

Le candidat peut utiliser des bascules RS, utiliser des sorties bistables, ou écrire des conditions d'auto-maintien.

**QA2-8** A chaque avance du convoyeur, les palettes sont avancées de 4 positions dans le système, et en plus, les palettes qui sont au poste de dépose voient leur nombre de poses s'incrémenter d'une unité.

L'algorithme est alors le suivant :

A chaque avance faire :

Début

A = V[81]

B = V[82]

C = V[83]

D = V[84]

Pour i = 80 jusqu'à 1 {parcourir la boucle dans le sens décroissant}

V[i+4]=V[i]

Fin Pour

V[1]=D

V[2]=C

V[3]=B

V[4]=A

V[17]= V[17]+1

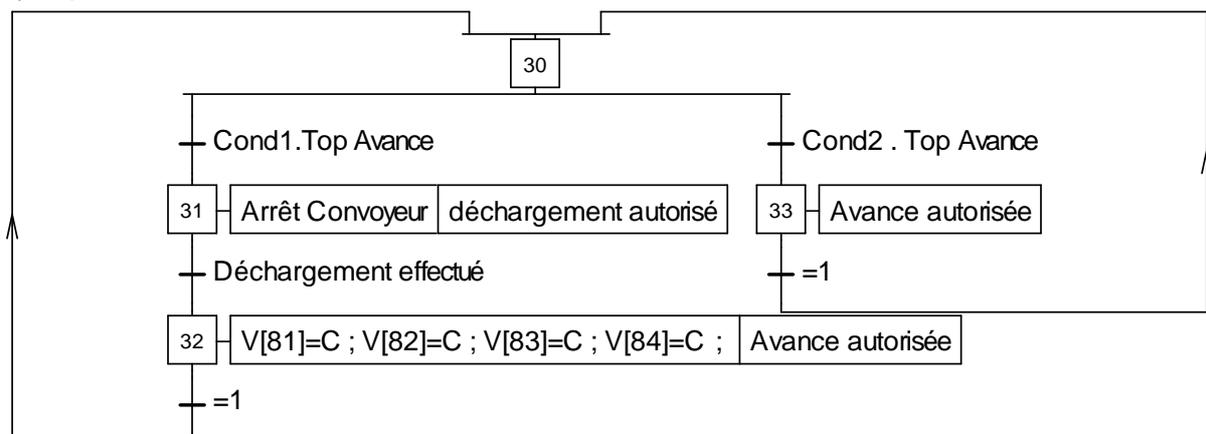
V[18]= V[18]+1

V[19]= V[19]+1

V[20]= V[20]+1

Fin

**QA2-9**

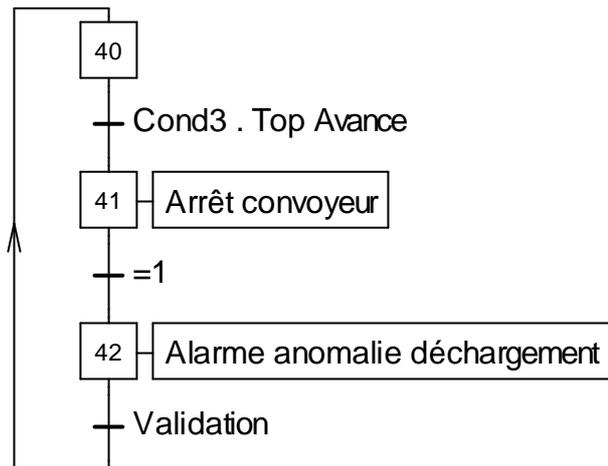


avec :

Cond1 = Présence palette . Présence article 1. Présence article 2. Présence article 3. Présence article 4

Cond2 = Présence palette . Présence article 1. Présence article 2. Présence article 3. Présence article 4.  $V[j] \neq$  nombre de marquages à faire pour  $j = 81, \dots, 84$

Cond3 : /Présence palette +/Présence article 1 + /Présence article 2 + /Présence article 3 +/Présence article 4



**QA2-10** La supervision peut être développée avec un progiciel de supervision ou à partir d'une programmation avec VB, VC, C#, etc. Pour créer l'animation demandée, il suffit de lire avec une fréquence à déterminer (par exemple 1s) les valeurs du tableau  $V[i]$ . Un lien communication doit être installé entre le poste de supervision et l'automate programmable. Ce lien peut être un réseau Ethernet, un réseau d'automatisme (ASi, CAN, Profibus, modbus+, etc.) ou une simple liaison série RS 232 ou RS 485. Les communications sans fil sont aussi possibles. La lecture des valeurs du tableau se fait au travers d'un protocole de communication compris par l'automate et le superviseur (exemple Modbus).

**QA2-11** On peut créer un compteur pour chaque heure de production. Le fonctionnement du compteur est validé uniquement lorsque le temps correspond à l'heure correspondante. On fait augmenter le compteur de 4 à chaque fois que des pièces sont déchargées des palettes. Exemple : supposons que le compteur C8 comptabilise le nombre de pièces fabriquées entre 8h et 9h  
On a

A chaque lot de 4 pièces déchargées

Début

Si  $H > 8h00$  et  $H < 9h00$

$C8 = C8 + 4$

Fin

**QA2-12** En mode dégradé, l'opérateur a besoin de 10 s supplémentaires.

- Cas des produits avec une seule dépose : pour 4 articles il faut :

$15 + 10 + 3 = 28$  s

La cadence horaire est alors de 514 articles. Soit une chute de 35% ;

- Cas des produits avec deux déposes : 4 articles sortent en moyenne tout les  $15 + 3 + 15 + 3 + 10 = 46$ s

La cadence horaire est 131 articles par heure au lieu de 400 par heure. Il y a alors une baisse de 21,7%.

**QA2-13** En mode dégradé, la baisse de productivité est importante (35 % pour les articles avec une dépose et 21% pour les articles avec 2 déposes). L'utilisation d'un deuxième opérateur peut être justifiée.

## Partie B : Étude du robot asservi de dépose du gel

### B1. ESTIMATION DE LA PRODUCTIVITÉ PRÉVISIONNELLE DU ROBOT

#### QB1-1

- Temps disponible pour le robot pour 4a articles : **15 s.**
- Temps pour faire une bande : 0,100 m à la vitesse de 0,2 m/s soit **0,5 s** (en négligeant les temps accélération et freinage)
- Temps pour passer d'une bande à une autre (suivant X) soit 2 cm :

Pente de l'accélération :  $V_x/T_x = 2,5 \text{ m/s}^{-2}$

Il faut  $L = V_{\text{moy}} \times 0,2 = 0,05 \text{ m}$  pour atteindre la vitesse maxi (on n'atteint pas la vitesse maxi)

$L = 1 \text{ cm}$  donc  $L = \frac{1}{2} \times 2,5 \times T^2$  et  $T = 2 \frac{\sqrt{0,01}}{2,5} = 0,08 \text{ s}$ . Donc le temps pour passer d'une bande à l'autre est le double (décélération) : **T = 0,16 s.**

- Temps maximum pour aller de la dernière bande de l'article n à la première de l'article n+1 (n=1, 2, ou 3) au premier point de dépose :

Si on considère le temps suivant X en supposant une origine proche du milieu de course :

Course maxi = 320 mm ; pente d'accélération et le freinage le robot parcourt 10 cm en 0,4s. Il reste à parcourir 310 mm à 0,5m/s : 0,62 s (le temps nécessaire suivant Y n'est pas critique ; en 0,62 s l'axe pourrait se déplacer d'environ 310 mm alors que le déplacement maxi nécessaire est de 140\*2 mm)

Le temps total de changement d'article : **0,62 s** (3 fois dans un cycle de 4 articles)

Pour 1 article

$N = \text{nombre de bandes par article. } N \times 0,5 + (N-1) \times 0,16 = 15/4 - \frac{3}{4} \times 0,62$  donc  $N=5,21$

**Soit environ 5 bandes maxi.**

Le temps pour déposer 5 bandes complètes est :  $5 \times 0,5 + 4 \times 0,16 + \frac{3}{4} \times 0,62 = \mathbf{3.605 \text{ s (pour 3,75 s)}}$

#### QB1-2

En faisant des lots de 4 chaussettes toujours identiques :

a) le robot peut réaliser 4 bandes alignées suivant Y avant de se décaler suivant X, il y a perte de temps entre les chaussettes mais gain de translation suivant X et gain sur les retours « à vide » entre deux chaussettes,

b) le robot peut piloter 4 buses identiques et réaliser 4 chaussettes identiques en même temps. On multiplie le nombre de bandes par 4 mais il faut valider cette solution qui modifie les inerties des pièces mobiles du robot.

## B2 - ESTIMATION DES PERFORMANCES DE L'AXE X DU ROBOT

### QB2-1 Transformée de Laplace des équations du moteur

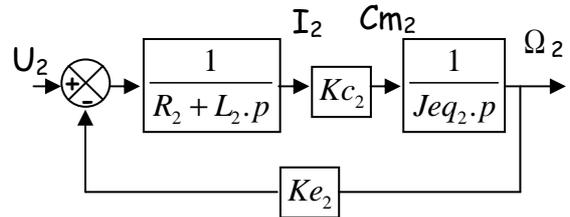
$$U_{L2}(p) = L_2 \cdot p \cdot I_2(p)$$

$$U_{R2}(p) = R_2 \cdot I_2(p)$$

$$U_2(p) = U_{R2}(p) + U_{L2}(p) + E_2(p)$$

$$E_2(p) = Ke_2 \cdot \Omega_2(p)$$

$$Cm_2(p) = Kc_2 \cdot I_2(p)$$



Équation énergie cinétique :

$$Cm_2(t) = J_2 \cdot \frac{d\omega_2(t)}{dt} + \left( \frac{r_2 \cdot p_2}{2\pi} \right)^2 \cdot (M_1 + m_1 + m_2) \cdot \frac{d\omega_2(t)}{dt} = Jeq_2 \cdot \frac{d\omega_2(t)}{dt} \text{ d'où } Cm_2(p) = Jeq_2 \cdot p \cdot \Omega(p)$$

$$\text{avec } Jeq_2 = \left( J_2 + \left( \frac{r_2 \cdot p_2}{2\pi} \right)^2 \cdot (M_1 + m_1 + m_2) \right)$$

### Étude du comportement du moteur :

$$H_{Mot2}(p) = \frac{\frac{1}{Ke_2}}{1 + \frac{R_2 \cdot Jeq_2}{Kc_2 \cdot Ke_2} \cdot p + \frac{L_2 \cdot Jeq_2}{Kc_2 \cdot Ke_2} \cdot p^2}, \quad \text{AN : } H_{Mot2}(p) = \frac{0.91}{1 + 3.46 \cdot 10^{-2} \cdot p + 3.26 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}$$

**QB2-2** Il y a une boucle de retour dans le schéma bloc mais ce n'est pas la boucle d'un capteur qui a pour but la mesure d'une grandeur physique. Ce n'est donc pas un asservissement.

**QB2-3** On peut approximer le comportement du moteur par un ordre 1 :

$$H'_{Mot2}(p) = \frac{27914}{(30 + p) \cdot (1032 + p)}$$

la racine 1032 n'a que peu d'influence donc : 
$$H'_{Mot2}(p) = \frac{\frac{1}{Ke_2}}{1 + \frac{R_2 \cdot Jeq_2}{Kc_2 \cdot Ke_2} \cdot p} = \frac{0.91}{1 + 3.46 \cdot 10^{-2} \cdot p}$$

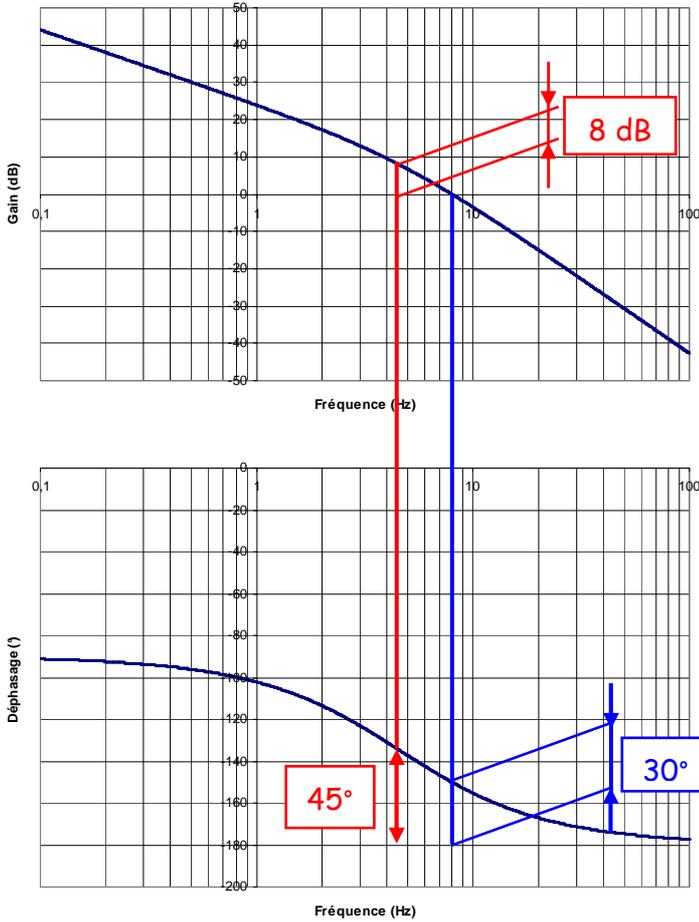
**QB2-4** Les codeurs incrémentaux fonctionnent sur un principe de comptage et décomptage d'impulsions. Le disque d'un codeur incrémental comporte deux types de pistes. La piste extérieure : (voie A ou voie A et B) est divisée en « n » intervalles d'angles égaux alternativement opaques et transparents, « n » s'appelant la résolution ou nombre de périodes ; c'est en effet le nombre d'impulsions qui seront délivrées par le codeur pour un tour complet de son disque.

- En amont du réducteur, le nombre d'impulsion par tour de la sortie du réducteur est plus important (multiplié par 1/r) donc le capteur est plus précis.

- L'inconvénient peut résider dans le jeu ou la déformation angulaire dans le réducteur.

**QB2-5**

Diagramme de Bode



**Etude de l'asservissement de position**

$$FTBO_2(p) = \frac{K_2}{Ke_2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_2 \cdot Je q_2}{Kc_2 \cdot Ke_2} \cdot p} \cdot \frac{1}{p}$$

La marge de phase est de 30° à 7,95 rad/s. Cette marge de phase n'est pas suffisante au regard du cahier des charges (45°) mais garantit la stabilité du système.

Correcteur à gain pur nécessaire  $k_G$  :  
 Mesure graphique de la valeur de gain  $k_G$  nécessaire (voir page ci-dessus)

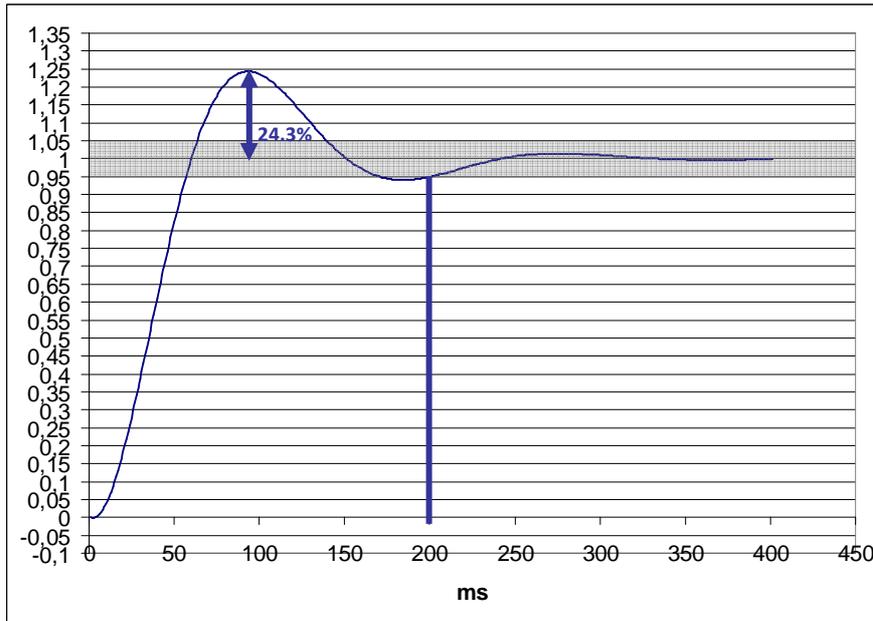
$\Delta\phi=45^\circ$  pour  $\omega_{\Delta\phi=45^\circ}=4.6$  rad/s le gain est de 7,8 dB; il faut donc traduire la courbe de -7,8dB.

$$20 \cdot \log(k_G) = -7,8 \text{ donc } k_G = 10^{\frac{-7,8}{20}} = 0,4$$

- Correcteur intégral inutile. Il va amplifier le risque d'instabilité.

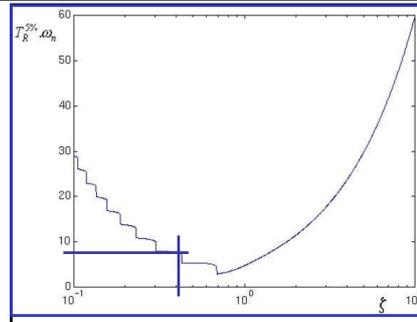
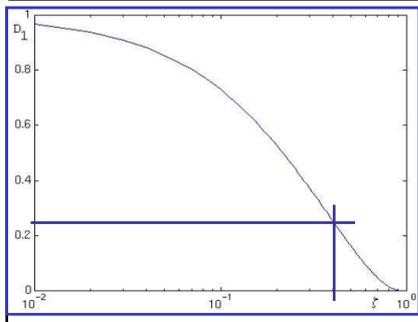
**QB2-6** Le système possède une intégration dans la boucle d'asservissement donc l'erreur statique est nulle.

**QB2-7**



Temps de réponse correct par rapport au CdC (<0,25s).

Peu d'oscillations.



Modélisation par un second ordre : 
$$H(p) = \frac{k}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} \cdot p + \frac{p^2}{\omega_n^2}}$$

Coefficient d'amortissement  $\xi=0,43$  ,  $Tr_{5\%} \times \omega_n = 7$  alors  $\omega_n = 35$  rad/s

**QB2-8** Équation de la dynamique en considérant uniquement la masse  $M_1$ , un frottement visqueux  $\mu$  et une déformation élastique de raideur  $k$  :

$$M_1 \cdot \frac{d^2 X_B}{dt^2} = -k \cdot (X_B - X) - \mu \cdot \frac{dX_B}{dt}$$

Transformation en Laplace, avec conditions initiales nulles :

$$(M_1 \cdot p^2 + \mu \cdot p + k) \cdot X_B = k \cdot X \qquad H_s(p) = \frac{X_B}{X} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\mu}{k} \cdot p + \frac{M_1}{k} \cdot p^2\right)}$$

En prenant un modèle poutre encastree de resistance des matériaux :

La flèche est  $\Delta X = \frac{FY^3}{3.E.I}$  donc la raideur  $k = \frac{Cste}{Y^3}$ .

**QB2-9** Second ordre :

Amortissement trop faible :  $\zeta=7,03 \cdot 10^{-3}$  et  $\omega_n = 141,4$  rad/s .

Le temps de réponse de la structure est très long et la structure va osciller (problème de résistance de la structure à long terme)

**QB2-10** Solution 1 : Augmenter le frottement fluide dans la structure en installant un amortisseur. Cette solution nécessite une augmentation de la masse de la structure à valider.

Solution 2 : Asservir la position de la buse elle-même. Cela nécessite l'installation d'un capteur de position au niveau de la buse, ce qui est difficile, ou l'installation d'un accéléromètre (difficile à exploiter).