

## CELLULE D'ASSEMBLAGE POUR AVION FALCON

*D'après concours E3A – PSI 2015.*

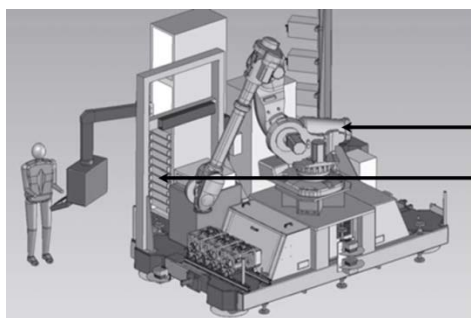
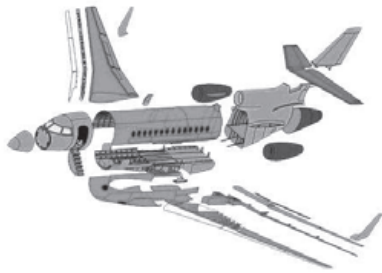
### Objectifs :

- ☐ Valider que l'asservissement du chariot permet de répondre au cahier des charges.

## 1 MISE EN SITUATION

### 1.1 Présentation

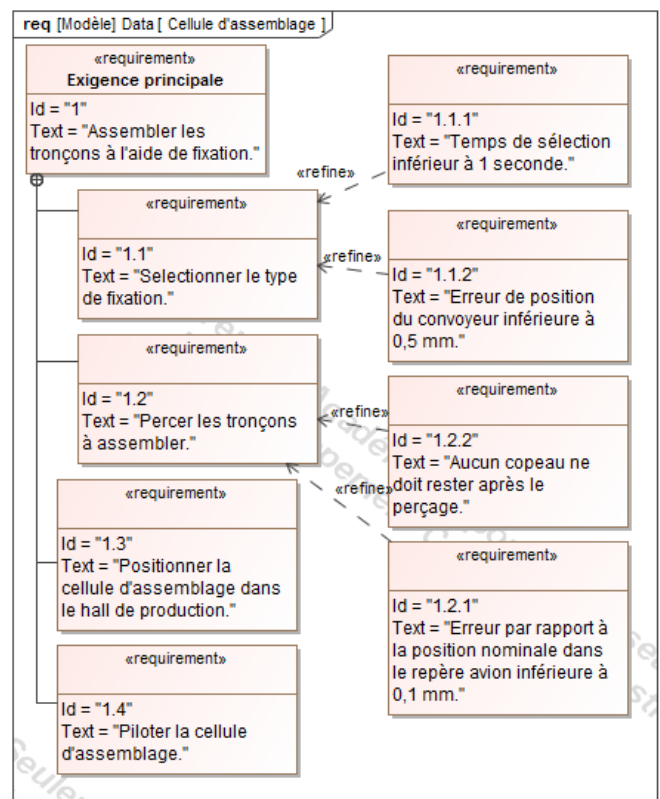
Le tronçon central du fuselage du Falcon 7X est assemblé par rivetage grâce à un robot 6 axes. Les rivets sont stockés dans des cassettes rangées verticalement. Un chariot de sélection se déplace verticalement pour déplacer une buse d'aspiration qui permettra d'acheminer les rivets contenus dans la cassette vers l'effecteur (robot). Le chariot fait l'objet de cette étude.



Robot 6 axes

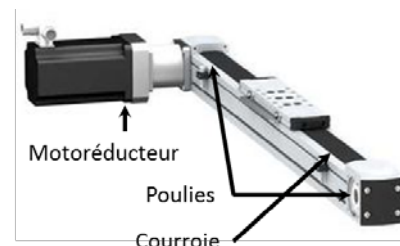
Magasin de stockage des rivets

L'objectif de cette partie est de valider les choix effectués par la société pour le sous ensemble de sélection des fixations de la cellule (exigence 1.1).

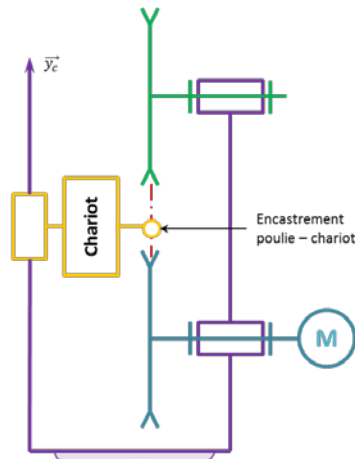


### 1.2 Axe chariot

Le déplacement du chariot est assuré par un axe numérique asservi en vitesse et en position. Cet axe est composé d'un moteur à courant continu, d'un système de transmission de puissance de type poulies / courroie et d'un rail.



## 1.3 Modélisation du système de déplacement du chariot



## 2 SÉLECTIONNER LES FIXATIONS – EXIGENCE 1.1

Afin de sélectionner le type de fixation, la buse d'aspiration doit être déplacée en face de la cassette avec une erreur inférieure à 0,5 mm (voir exigences fonctionnelles). Cependant le fabricant du système poulie-courroie du rail indique déjà une erreur de  $\pm 0,25 \text{ mm}$  due notamment à l'élasticité de la courroie. Par conséquent, l'erreur en position de la commande doit être nulle. De plus, afin de ne pas perdre de temps lors de la production, le temps maximal de déplacement lors de la sélection est imposé à une seconde.

L'étude se fera dans le cas le plus défavorable c'est-à-dire un déplacement du chariot vers le haut entre les deux cassettes de rivets les plus éloignées. L'axe de déplacement est appelé  $\vec{y}_c$ .

### 2.1 Notations domaine temporel – domaine de Laplace

Les notations entre le domaine temporel et celui de Laplace sont données dans la suite. Ainsi, si la fonction  $f(t)$  possède une transformée de Laplace, elle sera notée :  $F(p) = \mathcal{L}[f(t)]$ .

Les équations caractéristiques du moteur à courant continu sont rappelées ci-dessous (les conditions de Heaviside sont respectées) :

- ☐  $u(t) = e(t) + L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t)$ ;
- ☐  $e(t) = K_E \omega_m(t)$  ;
- ☐  $C_M(t) = K_C i(t)$  ;
- ☐  $J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt} + f \omega_m(t) = C_M(t) - C_R(t)$ .

Avec :

- ☐  $u(t)$  : tension moteur ;
- ☐  $i(t)$  : courant moteur ;
- ☐  $e(t)$  : force contre-électromotrice ;
- ☐  $\omega_m(t)$  : vitesse de rotation moteur ;
- ☐  $C_M(t)$  : couple moteur ;
- ☐  $C_R(t)$  : couple résistant modélisant l'action de pesant.

### 2.2 Critères à respecter pour l'exigence 1.2

Exigence	Critères	Niveaux
Déplacer le chariot	<b>Précision :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Erreur statique par rapport à une consigne de vitesse constante</li> </ul>	NULLE
	<b>Rapidité :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Temps de réponse à 5% en réponse à une consigne échelon</li> </ul>	$Tr_{5\%} = 0,1 \text{ s}$ maxi
	<b>Stabilité :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Marge de gain</li> <li>Marge de phase</li> </ul>	6dB mini 45° min

## 2.3 Choix d'une architecture de la chaîne de transmission

**Question 1.** Proposer sous la forme d'un schéma une autre solution permettant le déplacement du chariot. La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique par un moteur doit être conservée.

Compte tenu des vitesses de translation importantes, le système retenu est de type poulie-courroie.

## 2.4 Détermination de l'inertie équivalente

Les grandeurs caractéristiques (notations et valeurs) des éléments de l'axe du chariot sont données dans le tableau ci-dessous :

Moment d'inertie du rotor du moteur autour de son axe	$J_m$	$140 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment d'inertie du réducteur ramené à l'arbre moteur	$J_{réd}$	$60 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment d'inertie de la poulie motrice autour de son axe	$J_{PM}$	$38 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment d'inertie de la poulie réceptrice autour de son axe	$J_{PR}$	$38 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Masse totale du chariot	$M$	5 kg
Vitesse de rotation de l'arbre moteur	$\omega_m$	
Vitesse de rotation de l'arbre de sortie du réducteur	$\omega_r$	
Rayon d'une poulie motrice ou réceptrice	$R_P$	45 mm
Rapport de réduction réducteur ( $\omega_r / \omega_m$ )	$\lambda$	1/5

**Question 2.** À partir des grandeurs définies déterminer l'expression littérale de l'inertie équivalente  $J_{eq}$  de l'ensemble  $\Sigma = \{\text{moteur} + \text{réducteur} + \text{poulies} + \text{chariot}\}$  ramenée sur l'arbre moteur. Cette inertie équivalente est définie par  $\mathcal{E}_c(\Sigma) = \frac{1}{2} J_{eq} \omega_m^2$ .

**Question 3.** Déterminer la valeur numérique de l'expression précédente.

## 2.5 Modèle de connaissance du moteur à courant continu

### Objectif :

L'objectif de cette partie est d'établir un modèle de la motorisation de l'axe afin de simuler un déplacement.

**Question 4.** À partir des équations du moteur à courant continu, réaliser le schéma bloc du moteur à courant continu.

**Question 5.** En considérant que  $C_R(p) = 0$ , déterminer la fonction de transfert  $H_M(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U(p)}$  sous sa forme canonique.

**Question 6.** Montrer que la fonction de transfert  $H_M(p)$  peut se mettre sous la forme  $H_M(p) = \frac{K_C}{K_C K_E + R J_{eq} p + J_{eq} p^2}$ . Justifier la réponse. Pour cette question, la valeur numérique de  $J_{eq}$  considérée sera  $J_{eq} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2$  indépendamment du résultat numérique calculé précédemment.

**Question 7.** Montrer qu'avec l'expression,  $H_M(p)$  peut s'écrire sous la forme  $H_M(p) = \frac{K_M}{(1+T_E p)(1+T_M p)}$  avec  $T_E < T_M$ .

### 3 ÉTUDE DE L'ASSERVISSEMENT EN POSITION DE L'AXE

#### 3.1 Modélisation de l'asservissement en position

La partie précédente a permis de déterminer un modèle du moteur. La suite de l'étude va permettre, par simulation, de déterminer les réglages nécessaires de l'axe vis-à-vis du cahier des charges. La figure suivante présente le principe de l'asservissement de l'axe du chariot.



Les grandeurs caractéristiques des blocs de l'asservissement de l'axe chariot sont données dans le tableau ci-dessous :

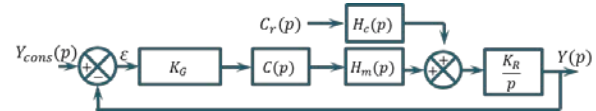
Générateur	$K_G$	À déterminer
Capteur de position	$K_{capt}$	$5 \cdot 10^{-3} V \cdot rad^{-1}$
Correcteur amplificateur	$C(p)$	Variable

**Question 8.** Quelle doit être la valeur de  $K_G$  pour assurer un asservissement correct (c'est à dire l'écart  $\varepsilon$  doit être nul si la position de l'axe est identique à la consigne) ?

**Question 9.** Donner le schéma bloc de l'asservissement.

#### 3.2 Étude du modèle simplifié

Afin de faciliter les calculs, le schéma bloc à retour unitaire est donné figure suivante. Le couple résistant  $C_R$  dû à l'action de pesanteur est supposé constant.



Avec :

- ☐  $H_M(p) = \frac{K_M}{(1+T_E p)(1+T_M p)}$ ;
- ☐  $H_C(p) = \frac{(R+Lp)K_M}{K_C}$ ;
- ☐  $C_R(p) = \frac{C_R}{p}$ ;
- ☐  $K_R = R_p \lambda$

**Question 10.** Donner l'expression de  $Y(p)$ .

**Question 11.** On souhaite déterminer l'erreur en position du système. Calculer l'écart statique pour  $C(p) = Kp$ .

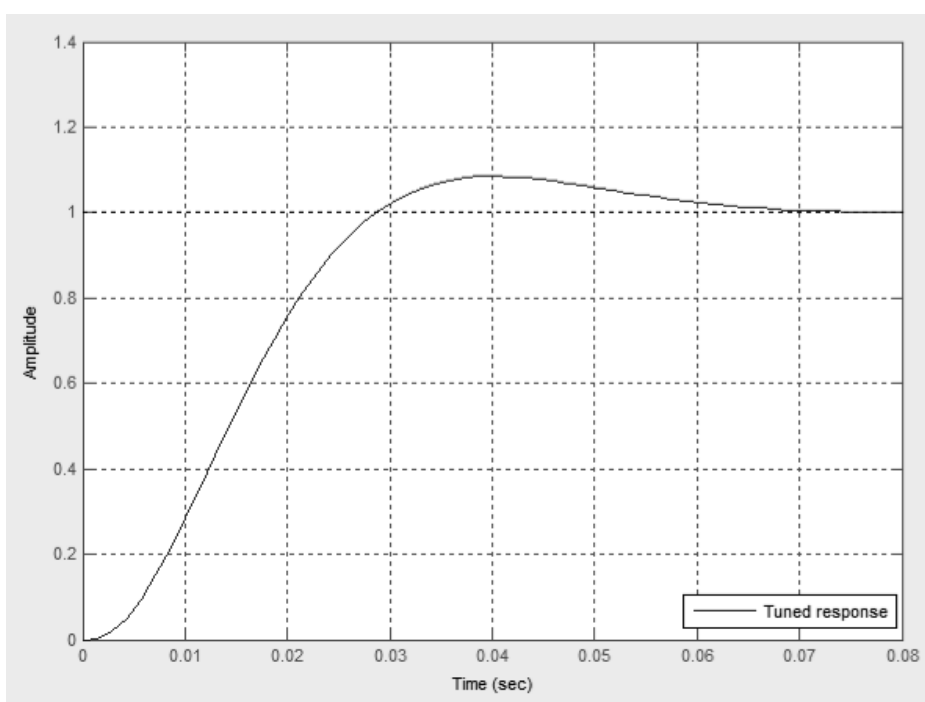
**Question 12.** On souhaite que lorsque le système se déplace à vitesse constante, l'erreur sur la vitesse atteinte par le système soit nulle. Quelle sollicitation doit-on utiliser. Calculer l'écart statique pour  $C(p) = Kp$  puis  $C(p) = \frac{Ki}{p}$ .

**Question 13.** Conclure.

Afin de répondre totalement au cahier des charges, l'utilisation d'un correcteur proportionnel intégral dérivé est retenue. En effet, la commande de l'axe intègre directement ce type de correcteur. Dans la suite du problème, le correcteur  $C(p)$  sera de la forme :  $C(p) = K_I \left(1 + \frac{1}{T_I p}\right) (1 + T_D p)$ . Le réglage des coefficients a été fait par simulation numérique.

Afin de vérifier maintenant le critère de rapidité, on donne la réponse temporelle (figure page suivante) de l'axe à un échelon de position de 1 m.

**Question 14.** Conclure sur la conformité au cahier des charges du système ainsi réglé.



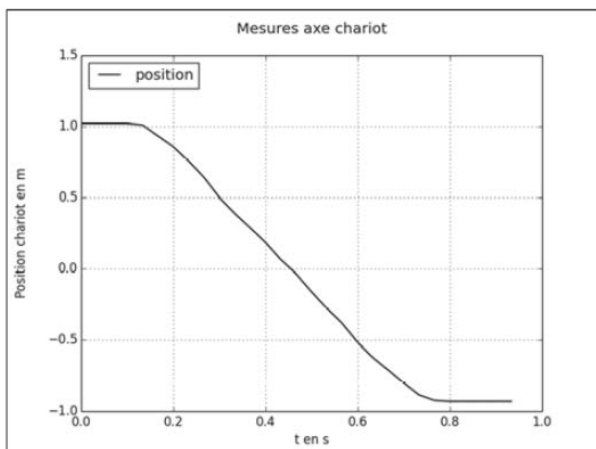
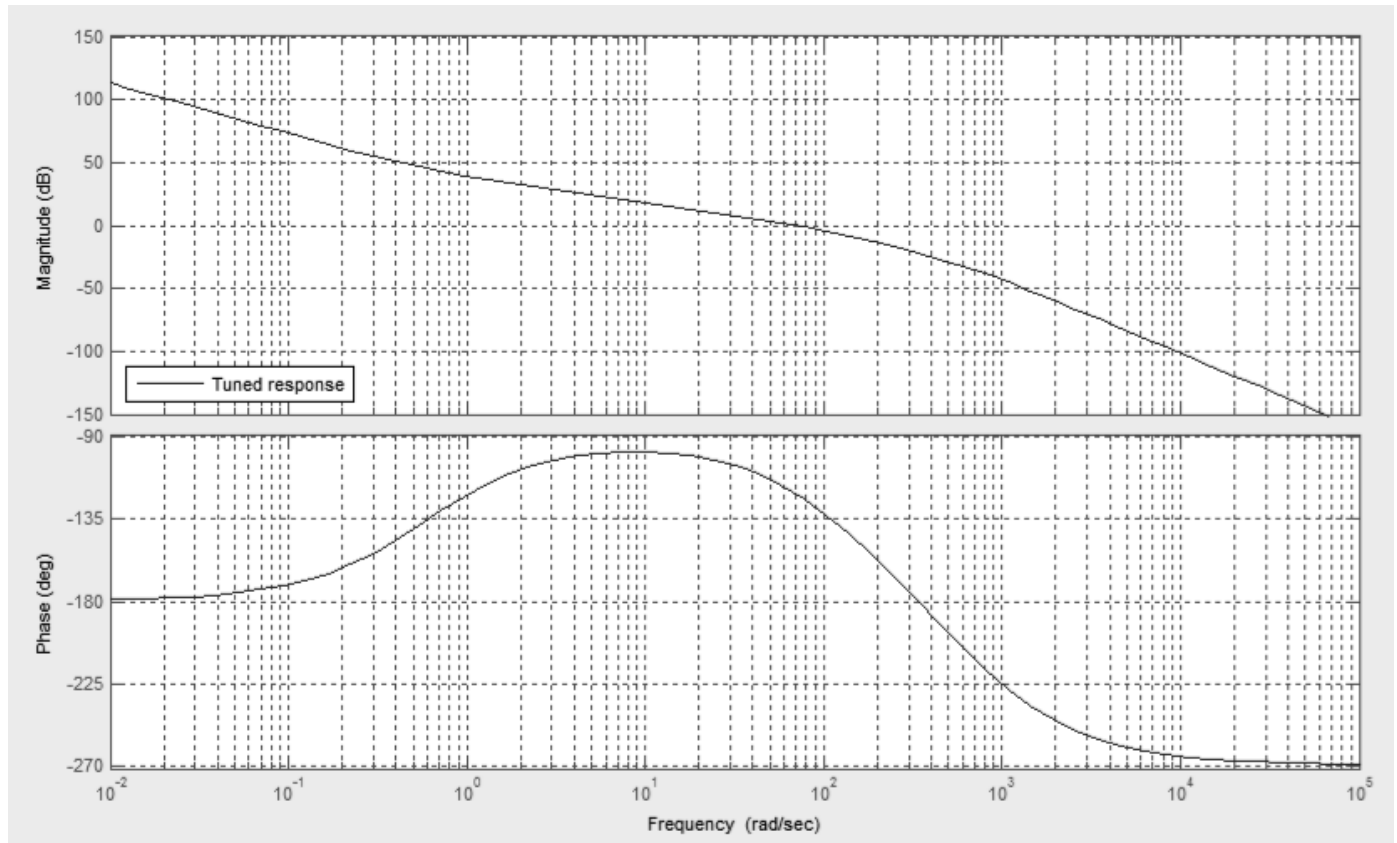
### 3.3 Tracé de diagramme de Bode

On considère  $C_R(p) = 0$ . On prendra  $K_M = 0,8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ ,  $T_e = 0,0051 \text{ s}$ ,  $T_m = 0,0074 \text{ s}$ .

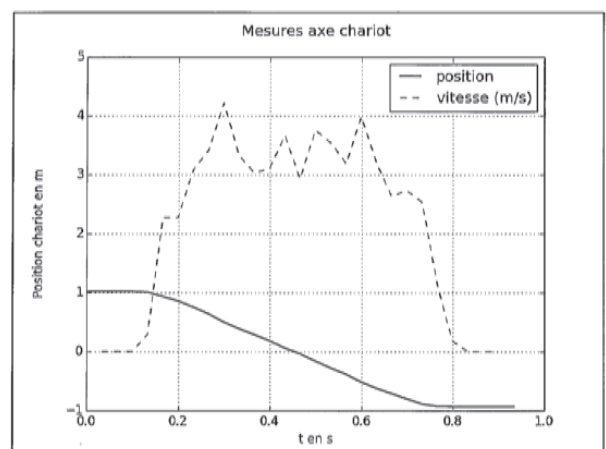
**Question 15.** Tracer le diagramme de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte pour  $C(p) = 1$ . Déterminer les marges de phase et les marges de gain.

**Question 16.** Tracer le diagramme de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte pour  $C(p) = \frac{1}{p}$ . Déterminer les marges de phase et les marges de gain.

**Question 17.** On donne ci-dessous les diagrammes de Bode avec les correcteurs optimisés. Déterminer les marges de gain et marges de phase.



Position du chariot en fonction du temps



Position et vitesse du chariot en fonction du temps

## 4 VERIFICATION DES PERFORMANCES DE L'AXE DU MAGASIN DE RIVETS

Afin de vérifier les réglages précédents, un essai sur le système réel est réalisé. L'absence de système d'acquisition dédié impose un système de mesure extérieur au système réel. C'est un dispositif d'analyse d'image qui est retenu pour ces mesures.

**Question 18.** À partir des relevés ci-dessous, conclure sur le respect des exigences fonctionnelles de l'axe du magasin de stockage des rivets (Exigence 1.1).

Le diagramme de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte  $HBO(p)$  est donné sur le document réponse. Le tracé est donné pour  $C(p) = 1$ .

**Question 19.** *Le système est-il stable ? Justifier la réponse.*

Le couple résistant est un couple constant  $C_0$  qui traduit l'action mécanique de pesanteur subie par l'ensemble mobile.

**Question 20.** *Justifier que si  $C(p) = 1$ , l'exigence fonctionnelle liée à la précision (erreur nulle) ne peut être respectée. Proposer une forme générale de fonction de transfert pour ce correcteur permettant de satisfaire à cette exigence fonctionnelle.*

Afin de répondre totalement au cahier des charges, l'utilisation d'un correcteur proportionnel intégral dérivé est retenue. En effet, la commande de l'axe intègre directement ce type de correcteur. Dans la suite du problème, le correcteur  $C(p)$  sera de la forme :  $C(p) = K_I \left(1 + \frac{1}{T_I p}\right) (1 + T_D p)$ . Le réglage des coefficients a été fait par simulation numérique.

**Question 21.** *Ce nouveau correcteur permet-il de respecter l'exigence fonctionnelle liée à la précision ? Justifier la réponse par un calcul littéral.*

Le diagramme de Bode de la nouvelle fonction de transfert en boucle ouverte  $H'BO(p)$  est donné sur le document réponse.

**Question 22.** *À partir du diagramme de Bode conclure sur l'exigence fonctionnelle liée à la stabilité.*

Afin de vérifier maintenant le critère de rapidité, on donne la réponse temporelle de l'axe à un échelon de position de 1 m.

**Question 23.** *Conclure sur la conformité au cahier des charges du système ainsi réglé.*

La simulation a permis de déterminer un réglage satisfaisant vis-à-vis des exigences fonctionnelles pour ce système. Il faut maintenant vérifier ces réglages par la mesure directe d'un déplacement de l'axe.

## 5 VERIFICATION DES PERFORMANCES DE L'AXE DU MAGASIN DE RIVETS

Afin de vérifier les réglages précédents, un essai sur le système réel est réalisé. L'absence de système d'acquisition dédié impose un système de mesure extérieur au système réel. C'est un dispositif d'analyse d'image qui est retenu pour ces mesures.

L'objectif de cette partie est de traiter les mesures obtenues puis de vérifier que les performances obtenues sont satisfaisantes.

**Question 24.** *À partir des mesures précédentes, conclure sur le respect des exigences fonctionnelles de l'axe du magasin de stockage des rivets.*