

Nom :	Remarques de l'enseignant :
Prénom :	

## TP : montage de roulements préchargés

### Objectif pour l'étudiant :

- Comprendre l'intérêt et le fonctionnement d'un montage de roulements préchargés.
- Choisir la valeur de la précharge pour répondre à un cahier des charges
- Comprendre l'intérêt de la précharge élastique

### Matériel à disposition :

- Sujet intégral (rendre page 2 à 8)
- Animation flash (à ouvrir avec un navigateur internet, testé avec Firefox, Chrome et IE)
- Document Excel pour les calculs et courbes

### Introduction :

Le procédé de fabrication appelé fraisage est très présent dans l'industrie. En particulier, l'industrie aéronautique et automobile requiert des machines de grandes dimensions. La Figure 1 montre un exemple de structure de Machine-Outil à Commande Numérique (MOCN) dite à structure portique.

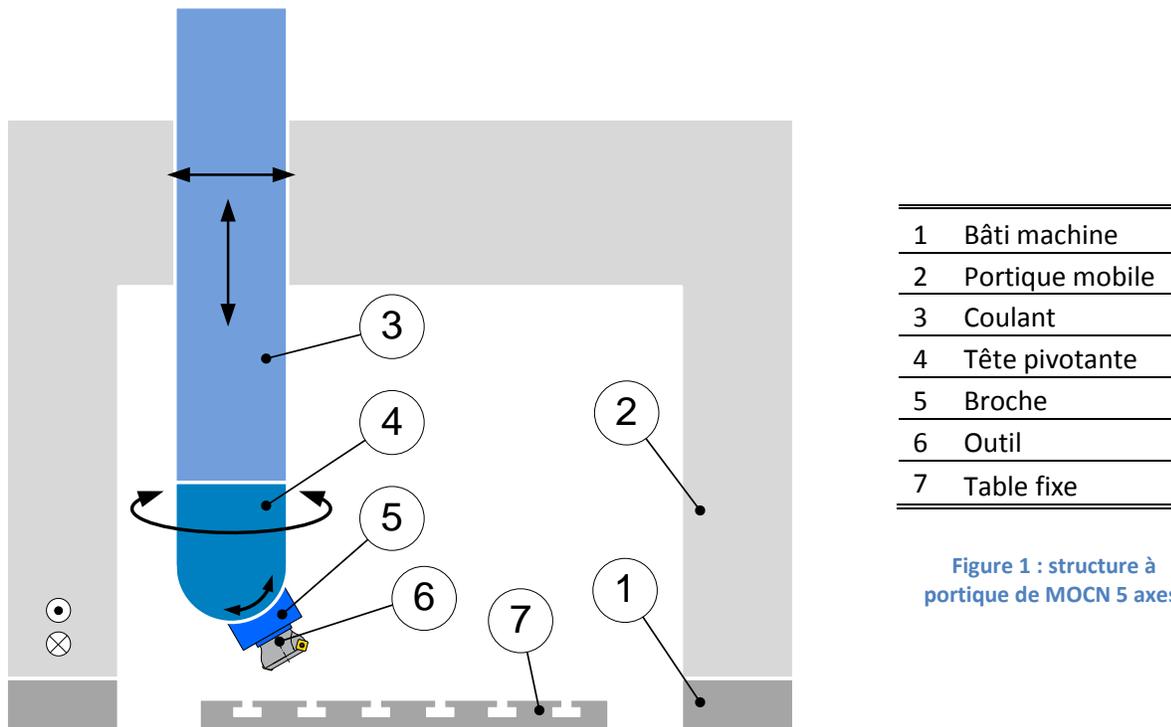


Figure 1 : structure à portique de MOCN 5 axes.

La **broche de machine-outil** réalise la liaison pivot entre l'outil et l'effecteur de la machine-outil ici la tête pivotante. La vue en coupe de la broche de fraisage est présentée Figure 2 avec sa nomenclature.

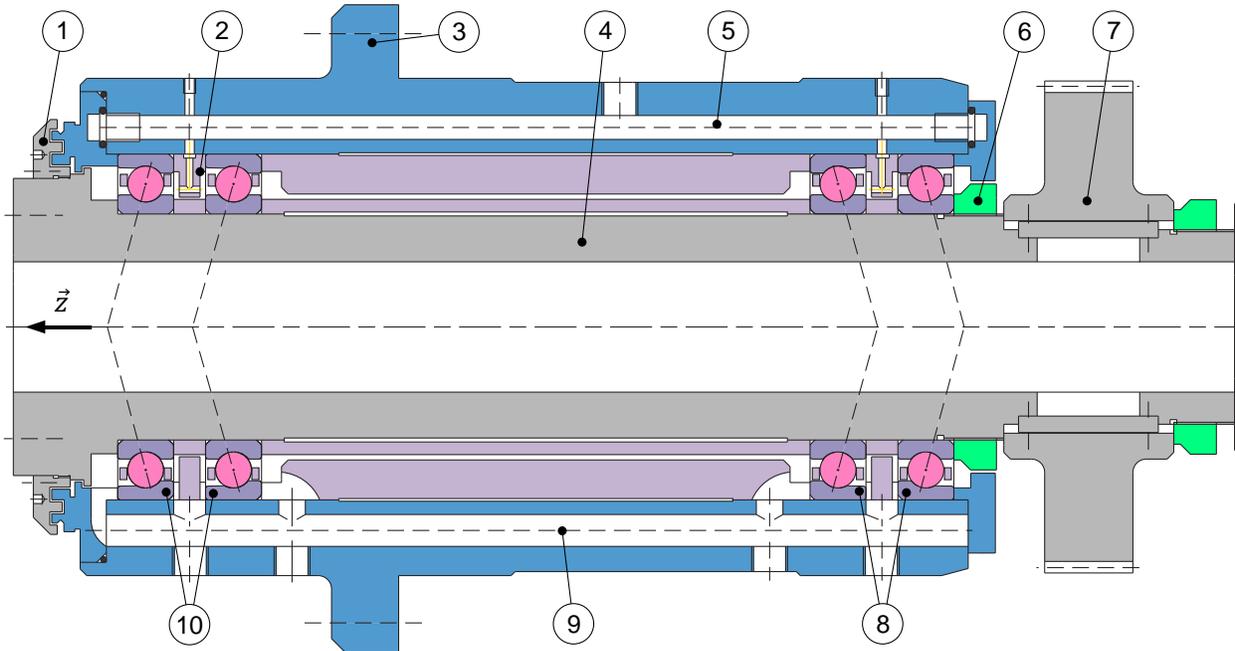


Figure 2 : broche de fraisage.

1	Joint chicane (sans contact)	7	Poulie d'entraînement
2	Injecteur de lubrification	8	Palier droit (roulements à billes à contact oblique)
3	Corps de broche et sa collerette de fixation	9	Canal d'évacuation du mélange air-huile
4	Arbre (=rotor)	10	Palier gauche (roulements à billes à contact oblique)
5	Canal d'alimentation en mélange air-huile		
6	Ecrou de serrage		

Un extrait du cahier des charges est donné dans le tableau suivant :

FS	Critère d'appréciation	Niveaux	Flexibilité
Guider l'outil en rotation	Mobilité autorisée	1 rotation suivant l'axe $\vec{z}$	F1
	Raideur axiale* $k_{br}$ minimale	300 N/ $\mu\text{m}$	F1
	Charge axiale* $F_a$ admissible**	-1000 N < $F_a$ < 1000 N	F1
	Charge radiale* $F_r$ admissible**	-1200 N < $F_r$ < 1200 N	F1
	Durée avant entretien sous 80% de la charge radiale* maximale	8000 h	F2

\* "axiale" et "radiale" sont considérées par rapport à l'axe de symétrie de l'outil  $\vec{z}$

\*\* appliquée à la base de l'outil, les charges radiales et axiales peuvent être combinées

Les **roulements à contact oblique** constituent la solution privilégiée pour répondre au cahier des charges. Ils ont l'avantage d'admettre des charges radiales et axiales. Cependant pour réaliser des liaisons de type pivot, ils doivent être au minimum montés par paire et en opposition. Nous allons aborder dans ce TP la **précharge de montage de roulements**, c'est-à-dire l'effort axial initial (broche au repos) appliqué sur le montage.

En se plaçant dans une phase de conception de la broche, nous définirons l'effort de précharge à appliquer pour respecter le critère de raideur axiale du cahier des charges. Nous étudierons ensuite une alternative au montage présenté en cas de détérioration prématurée.

## 1. Généralités

En se basant sur l'animation flash, répondre aux questions suivantes.

### Montage 1 : précharge rigide.

Sur le montage 1, régler une valeur de précharge  $P$  non nulle, puis faites varier l'effort axial  $F$  sur l'arbre vers la droite en observant le modèle animé dans la partie inférieure.

Régler alors l'effort  $F$  pour que le système soit à la limite du décollement du palier droit.

Q1.1. Que peut-on alors dire du déplacement  $u$  de l'arbre par rapport à la déflexion de précharge du palier droit  $d_{2,0}$  (= écrasement initial du palier droit dû à l'effort de précharge  $P$ ). Justifiez la réponse en vous aidant de la synthèse de l'animation.

$u =$

car

.....

Q1.2. Sur la Figure 3, page suivante, représenter l'effort  $F$  lorsque le système est à la limite du décollement du palier droit. Que dire de la valeur de  $F_1$  ?

$F_1 =$

Q1.3. En écrivant l'équilibre de l'arbre, et utilisant la synthèse de l'animation, calculer analytiquement l'effort  $F$  à appliquer pour qu'il y ait décollement du palier droit (lorsque  $u = d_{2,0}$ ). On exprimera  $F$  en fonction de  $K_1$ ,  $d_{1,0}$  et  $d_{2,0}$ .

Faites varier l'effort axial  $F$  sur l'arbre vers la gauche en observant le modèle animé dans la partie inférieure. Réglez alors l'effort  $F$  pour que le système soit à la limite du décollement du palier gauche.

Q1.4. Que peut-on alors dire du déplacement  $u$  de l'arbre par rapport à la déflexion de précharge du palier gauche  $d_{1,0}$  (= écrasement initial du palier gauche dû à l'effort de précharge  $P$ ). Justifiez la réponse en vous aidant de la synthèse de l'animation.

$u =$  \_\_\_\_\_ car \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Q1.5. Sur la Figure 4, page suivante, représenter l'effort  $F$  lorsque le système est à la limite du décollement du palier gauche. Que dire de la valeur de  $F_2$  ?

$F_2 =$  \_\_\_\_\_

Q1.6. En écrivant l'équilibre de l'arbre, et utilisant la synthèse de l'animation, calculer analytiquement l'effort  $F$  à appliquer pour qu'il y ait décollement du palier gauche (lorsque  $u = -d_{1,0}$ ). On exprimera  $F$  en fonction de  $K_2$ ,  $d_{1,0}$  et  $d_{2,0}$ .

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

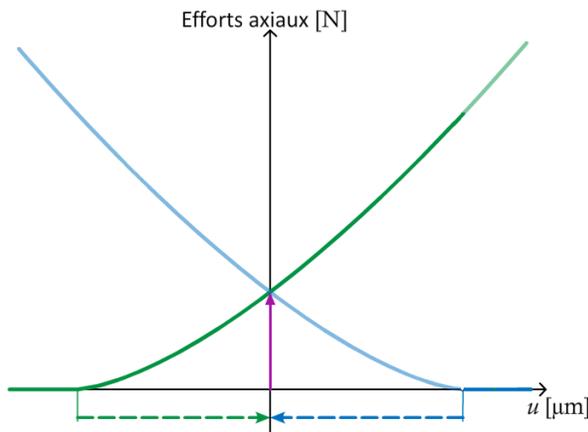


Figure 3 : décollement palier gauche.

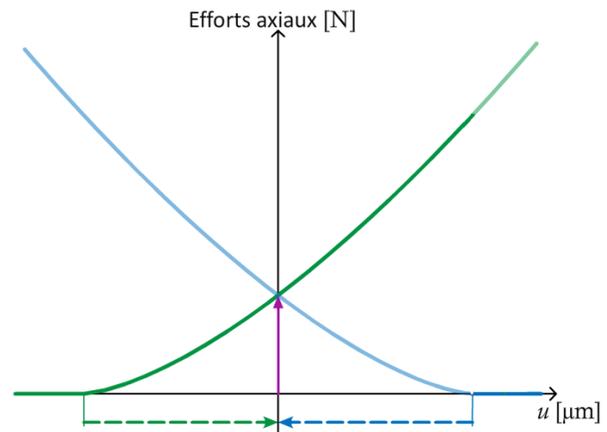


Figure 4 : décollement palier droit.

**Comparons les deux montages à précharge rigide : montages 1 et 2.**

Sur le montage 1, régler l'effort  $F$  pour que le système soit à la limite du décollement du palier droit. Cliquer alors sur le montage 2

Q1.7. A-t-on augmenté ou diminué l'effort de décollement du palier droit en ajoutant un roulement à gauche (montage 2) ?

Sur le montage 1, régler l'effort  $F$  pour que le système soit à la limite du décollement du palier gauche. Cliquer alors sur le montage 2.

Q1.8. A-t-on augmenté ou diminué l'effort de décollement du palier gauche en ajoutant un roulement à gauche (montage 2) ?

**Montage 3 : précharge élastique**

Le palier droit est modélisé par deux ressorts en série respectivement de raideur  $k_p$  pour les ressorts de précharge et de raideur  $k_2$  pour le roulement. Le modèle équivalent est un ressort simple avec :

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_2} , \text{ où } k_{eq} \text{ serait la raideur équivalente du palier droit.}$$



Q1.9. A partir de la formule donnée, exprimer  $k_{eq}$  en fonction de  $k_2$  et  $k_p$ . Effectuer l'application numérique pour  $k_p = 2N/\mu m$  et  $k_2 = 150N/\mu m$ .

Q1.10. Pourquoi peut-on considérer que le palier droit se comporte quasiment comme s'il n'y avait que les ressorts de précharge ? Expliquer grâce à l'animation que c'est bien le cas.

---



---



---



---



---

## 2. Choix de la précharge

Dans le cahier des charges de la broche, il est spécifié que la raideur axiale  $k_{br}$  doit être supérieure à 300N/micron pour  $F$  compris entre  $-1000N$  et  $1000N$ . Nous allons choisir la précharge  $P$  nécessaire pour obtenir cette raideur  $k_{br}$ .

Pour de multiples contraintes fonctionnelles de la broche, un type de roulement a été sélectionné. Le fichier Excel joint donne les résultats expérimentaux de l'essai représenté ci-dessous. Cet essai a pour but de caractériser le comportement du roulement en mesurant le déplacement axial  $d$  pour un effort axial  $F_A$ .

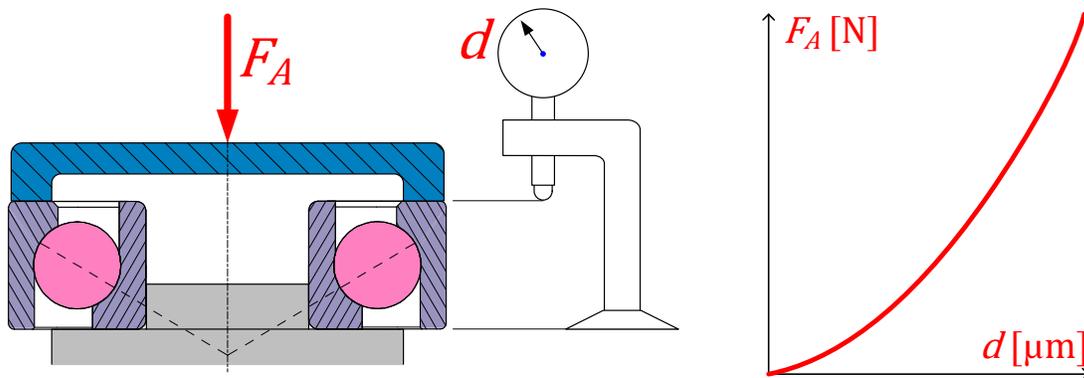


Figure 5 : principe de mesure du comportement du roulement.

Le comportement du roulement est du type  $F_A = Kd^\gamma$ . En utilisant les données expérimentales du tableur (feuille de calcul nommée « Q2.1 Identification expérimentale »), l'objectif est d'identifier les paramètres  $K$  et  $\gamma$ .

Q2.1. Pour cela :

- Remplir les colonnes  $\ln(F_A)$  et  $\log(d \cdot 10^{-6})$  de la feuille de calcul Excel en utilisant la fonction de calcul de logarithme (LN) de Excel.
- Sur la courbe de  $\ln(F_A)$  en fonction de  $\ln(d)$  automatiquement tracée, faire apparaître la droite représentant au mieux la courbe. Pour cela, effectuer une régression linéaire, en

faisant clic-droit sur l'un des points tracés sur la courbe et choisissant « Ajouter une courbe de tendance... », cocher la case « Afficher l'équation sur le graphique » et « Afficher le coefficient de détermination ( $R^2$ ) sur le graphique »

- Relever les valeurs de  $\ln(K)$  et  $\gamma$  en sachant que la courbe obtenue est du type :  $y = \gamma x + \ln(K)$  (où  $y$  représente  $\ln(F_A)$  et  $x$  représente  $\ln(d)$ )

$\ln(K) =$

$\gamma =$

- Q2.2. Reporter les valeurs de  $\ln K$  et  $\gamma$  dans les deux cases du tableur prévues à cet effet. Indiquer la valeur de  $K$  obtenue :

$K =$

L'objectif des deux questions qui suivent est de déterminer l'effort de précharge  $P$  et l'écrasement de précharge  $d_{1,0} + d_{2,0}$  correspondant pour répondre au cahier des charges. Pour cela, se reporter à la feuille de calcul nommée « Q2.3 Choix de la précharge rigide » du fichier Excel.

- Q2.3. Imprimer l'abaque donnant la raideur  $k_{br}$  en fonction de l'effort sur l'arbre  $F$ . Grâce à cette abaque et à une construction graphique à effectuer, déterminer la précharge  $P$  à appliquer pour que la raideur axiale de la broche soit conforme au cahier des charges :

$$k_{br} \geq 300 \text{ N}/\mu\text{m pour } -1000 < F < 1000.$$

$P =$                        $\text{N}$

- Q2.4. Grâce aux données du tableur, extraire la valeur de  $d_{1,0} + d_{2,0}$  pour la valeur de l'effort de précharge trouvée à la question Q2.3.

$d_{1,0} + d_{2,0} =$                        $\mu\text{m}$

### 3. Passage en précharge élastique

Deux prototypes ont été réalisés avec le montage rigide. Des tests ont montré une perte considérable de raideur de la broche en fonctionnement. Une Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) a révélé que cette perte de raideur était due à un différentiel de température trop important entre le corps de la broche et le rotor.

Considérons le montage avec précharge rigide de la broche Figure 2. Si l'arbre s'allonge de la valeur  $\Delta d = d_{1,0} + d_{2,0}$  par rapport au corps de broche, la précharge est nulle. Soient  $T_{\text{arbre}}$  et  $T_{\text{corps}}$  les températures supposées homogènes de l'arbre et du corps de broche.

Q3.1. Grâce à la formule suivante, calculer le différentiel de température  $\Delta T$  qui annule l'écrasement de précharge (on prendra  $d_{1,0} + d_{2,0} = 6,9\mu\text{m}$ ).

$$\Delta d = \lambda \Delta T d$$

Avec :

- $\Delta d$  allongement du rotor par rapport au stator [ $\mu\text{m}$ ] (voir Q2.3 pour la valeur)
- $\Delta T = T_{\text{arbre}} - T_{\text{corps}}$  différentiel de température [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $d = 256.10^{-3} \text{ m}$  distance entre les centres de poussée des paliers droit et gauche
- $\lambda = 11.7\mu\text{m}/^{\circ}/\text{m}$  coefficient de dilatation l'acier

.....

.....

.....

.....

Dans la pratique, le différentiel de température  $\Delta T$  s'avère largement plus important que trouvé à la question précédente. La précharge rigide n'est donc plus envisageable. Considérons le système de précharge élastique toujours pour les deux tandems de roulements montés en "O".

L'objectif des deux questions qui suivent est de déterminer l'effort de précharge  $P$  et l'écrasement  $e$  du ressort de précharge afin de répondre au cahier des charges. Pour cela, se reporter à la feuille de calcul nommée « Q3.2 Choix de la précharge élastique » du fichier Excel.

Q3.2. Imprimer l'abaque représentant la variation de la raideur  $k_{br}$  en fonction de l'effort sur l'arbre  $F$ . Grâce à cette abaque, déterminer la précharge  $P$  à appliquer pour que la raideur axiale de la broche soit conforme au cahier des charges :

$$k_{br} \geq 300 \text{ N}/\mu\text{m} \text{ pour } -1000 < F < 1000.$$

$P = \quad \quad \quad N$

Q3.3. Calculer l'écrasement  $e$  des ressorts pour obtenir la précharge  $P$  déterminée à la question précédente en considérant la raideur des ressorts  $k_p = 2\text{N}/\mu\text{m}$

$e =$