

# Etude tribologique de l'emmanchement en force dans des tôles embouties

L. BOISSONNET<sup>a,b</sup>, P. MONTMITONNET<sup>a</sup>, F. LEHOUX<sup>b</sup>

a. Mines ParisTech, CEMEF- Centre de Mise en Forme des Matériaux, CNRS UMR 7635,  
BP 207 - 1 rue Claude Daunesse - 06904 Sophia Antipolis Cedex, France

b. Renault Le Mans - 15 avenue Pierre Piffault - 72086 Le Mans Cedex, France

## Résumé :

L'emmanchement en force à la presse est une opération conditionnée par le frottement: c'est lui qui explique la force nécessaire à l'emmanchement, c'est lui qui détermine la force de démanchement. Après une analyse succincte de la mécanique de l'opération, nous montrons comment la surface des pièces est transformée par ce contact glissant sévère. Sur la base de ces analyses mécaniques, des essais tribologiques simulant ce contact sont proposés pour reproduire ces transformations dans des conditions plus aisément dépouillables.

## Abstract :

The press-fit process is governed by friction : its level is conditioning the force necessary to put the bushing in the shaft and the force of removing. After a short mechanical analysis of the process, we show how the parts surfaces are scuffed by the harsh sliding contact. Based on these analyses, tribological tests are proposed to simulate this contact aiming at reproducing these transformations in more readable conditions.

**Mots clefs :** procédé d'assemblage, calcul de structures, frottement, revêtement organique, endommagement

## 1 Introduction

L'assemblage de pièces par emmanchement en force est très couramment utilisé dans le secteur automobile. Les configurations sont diverses mais la maîtrise de l'effort d'emmanchement est toujours importante. En effet, la tenue de l'assemblage face au démanchement doit être garantie, sous les diverses sollicitations mécaniques et malgré le possible vieillissement des matériaux ; l'expérience montre qu'elle est fortement corrélée à l'effort d'emmanchement. C'est donc sur la prédiction des efforts d'emmanchement et la tenue au démanchement de l'assemblage sous une sollicitation axiale de la pièce mâle que s'articule notre activité : comme pour tout assemblage fretté la problématique combine mécanique des structures et tribologie, avec comme particularité la nature du contact avec un revêtement organo-métallique qui est endommagé vu l'intensité du contact au cours de l'emmanchement. Le niveau de frottement est d'ailleurs un paramètre mal connu auquel les efforts sont très sensibles.

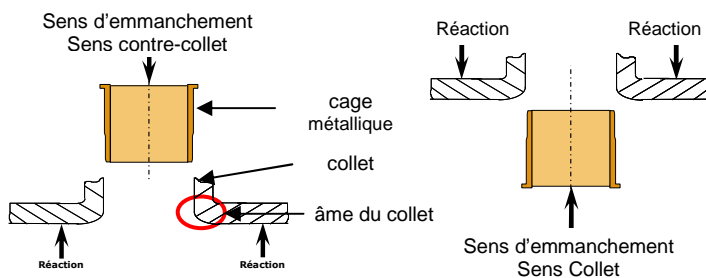


FIG. 1 – Géométrie des emmanchements considérés – sens contre-collet et sens collet

Cet article traite de l'emmanchement en force de pièces cylindriques dont la surface est un tube en acier revêtu de zinc-nickel (Figure 1) ; les pièces femelles considérées sont des collets formés par emboutissage de tôles en acier poinçonnées et revêtues de cataphorèse – dépôt électrolytique de résine époxy chargée en

alumino-silicates et noir de carbone. Les serrages (écart au diamètre entre la pièce mâle et la pièce femelle) sont élevés, de sorte qu'on n'est pas dans le cas courant du frettage élastique : on a une déformation plastique des pièces. On considère dans la suite tant l'emmanchement en sens collet (mouvement dans le même sens qu'en emboutissage du collet) qu'à contre-collet (Figure 1).

## 2 Modélisation de l'emmanchement

La complexité de la géométrie du collet nous a conduit à utiliser des simulations éléments finis pour appréhender la mécanique de l'emmanchement. Les efforts considérés sont l'effort de poussée sur la pièce mâle en fin de course – « effort d'emmanchement » - ainsi que l'effort axial nécessaire pour décaler la pièce mâle de son positionnement emmanché dans le sens opposé à l'emmanchement – « effort de démanchement ».

### 2.1 Etude bibliographique sur l'emmanchement

La littérature propre à l'emmanchement de pièces cylindriques est assez pauvre avec principalement des approches de type « frettage » c'est-à-dire qu'on ne prend pas en compte l'historique de l'emmanchement mais simplement les contraintes et déformation radiale générées par la mise à un diamètre commun des deux pièces comme dans le cas du frettage thermique.

Il existe des approches analytiques de frettage élastoplastique [1] [2] qui considèrent une pression de contact uniforme dans la zone de frettage. Nous avons transposé ces travaux à nos géométries d'emmanchement en utilisant la théorie des coques minces qui s'applique à la cage métallique de la pièce mâle et au collet en dehors de la proximité du rayon qu'on appelle âme du collet (Figure 1). L'emmanchement met la cage métallique en compression essentiellement orthoradiale tandis que le collet est mis en traction orthoradiale. Dans tous les cas les serrages sont tels qu'on atteint la plasticité de la cage métallique de la pièce mâle au moins dans l'âme du collet (qu'on prend arbitrairement de longueur égale à l'épaisseur du collet) qui ne se déforme que très peu. Soit  $P_c$  la pression de contact entre les 2 pièces, la valeur absolue de la contrainte orthoradiale dans une pièce vaut  $P_c R/e$  avec  $R$  le rayon de la pièce et  $e$  son épaisseur spécifique. La plasticité est alors atteinte lorsque cette contrainte orthoradiale atteint la limite plastique  $R_l$  de la cage métallique. Par conséquent, un ordre de grandeur de la pression de contact est  $R_l e/R$ .

Crocco et al. [3] ont travaillé sur des emmanchements avec un cadre géométrique proche du nôtre mais les serrages sont plus faibles de telle sorte qu'on reste dans le domaine de la déformation élastique. Ainsi les simulations numériques utilisées pour représenter l'emmanchement sont des simulations de frettage élastique ; cependant déjà les auteurs remarquent que dans certains cas expérimentaux, ils atteignent la plastification d'une pièce et que le contact est modifié par rapport à leurs résultats de simulation.

Il est clair que dans les cas où le serrage est élevé et induit une déformation plastique, la simulation numérique de l'opération d'emmanchement est importante car son historique joue sur les déformations. C'est ce qu'ont réalisé Korhonen et al. [4] qui ont rencontré ce problème dans le cas d'emmanchement de connecteurs électroniques. Leur observation majeure sur la répartition du contact est que celui-ci est en fait très localisé en bordure de la zone d'emmanchement. D'autre part, pour estimer comparativement la tenue au démanchement, ils ont aussi simulé cette étape.

### 2.2 Analyse des mécanismes de déformation

#### 2.2.1 Etat global de contraintes – déformation

La Figure 2 illustre ces constatations bibliographiques, elle compare les efforts de démanchement entre une approche analytique de type « frettage » et des simulations numériques sous Abaqus® modélisant l'opération d'emmanchement, et ce avec un coefficient de frottement de 0,3. En confrontant ces résultats à l'expérience, outre le niveau d'effort simulé qui dépend du coefficient de frottement postulé, on remarque expérimentalement que l'augmentation du serrage a légèrement tendance à diminuer l'effort de démanchement. Pour les résultats de calcul, si à faible serrage en déformation élastique les modèles de frettage (analytique ou numérique) et le modèle simulant l'emmanchement sont assez équivalents, ce n'est plus le cas dans la plage de serrage qui nous concerne et seule une simulation de l'emmanchement permet de

reproduire la bonne tendance du serrage.

Outre cette constatation, il est à noter que l'approche frettage ne distingue pas les efforts d'emmanchement et de démanchement, ce qui rend impossible de prendre en compte une corrélation entre ces deux efforts. Pour estimer le démanchement, on simulera donc également cette opération comme Korhonen et al. [4].

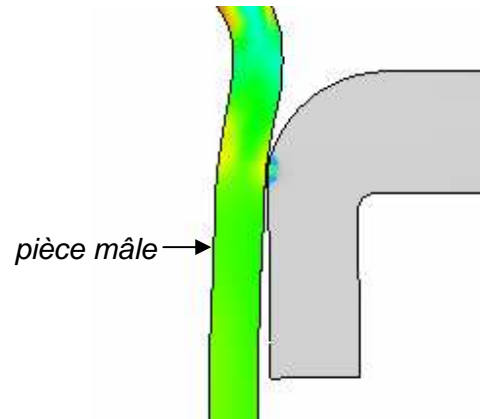
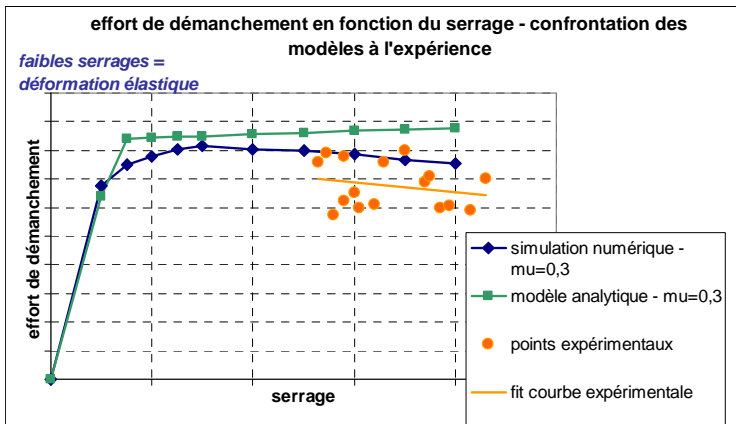


FIG. 2 – Confrontation des modèles avec l'expérience sur un cas d'emmanchement

FIG. 3 – Exemple de cartographie de déformation après emmanchement en sens collet (déformations axiales amplifiées par un facteur 2)

### 2.2.2 Répartition du contact

On s'intéresse à la répartition du contact obtenue en simulation car elle est directement liée aux efforts. En effet, en première approche, l'effort d'emmanchement ou de démanchement  $E$  correspond à l'intégrale sur la surface de contact de la contrainte tangentielle de frottement soit à coefficient de frottement  $\mu$  constant :

$$E = \left( \int_{\text{surface de contact}} P_c \cdot dS \right) \cdot \mu. \tag{1}$$

En réalité, l'opération d'emmanchement impacte l'état emmanché au sens où la répartition des contraintes et déformations est très différente de celle qu'on obtient avec des simulations de frettage. En effet, l'âme du collet (zone située dans le prolongement de la tôle à la sortie du rayon d'entrée du collet, comme défini sur la Figure 1) est toujours une zone de fort contact, mais ce n'est pas systématiquement le cas pour le reste du collet. La déformation de la cage métallique au début du contact induit sa flexion comme on le voit sur la Figure 3 ; en fait la zone centrale voit systématiquement une perte de contact et les conditions de serrage, le frottement et le sens d'emmanchement influent.

Ainsi, pour un emmanchement dans le sens du collet, les simulations indiquent que le contact est fortement localisé dans l'âme du collet, et dans une moindre mesure en sortie de collet avec des variations selon les paramètres qu'on détaillera. Pour un emmanchement à contre-collet, le contact est réparti de manière un peu moins hétérogène avec des pressions de contact plus élevées à l'entrée du contact (soit en sortie du collet) et dans l'âme du collet – cf Figure 4.

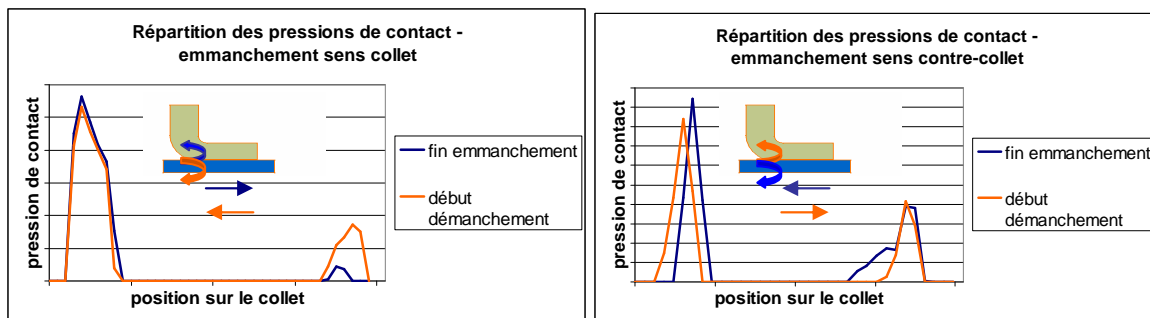


FIG. 4 – Comparaison de la répartition du contact simulée à l'emmanchement et au démanchement

De la même manière pour un sens d'emmanchement donné on note également une modification de la répartition du contact selon le sens de poussée (emmanchement ou démanchement).

Pour un emmanchement en « sens collet », la résultante du frottement exerce sur le collet un couple qui a tendance à « ouvrir » ce dernier à l'emmanchement et à le « refermer » au démanchement : par conséquent on a potentiellement plus de contact au démanchement qu'à l'emmanchement. Cela explique que l'effort de démanchement puisse être supérieur à l'effort d'emmanchement – cf Figures 4 et 6.

Pour un emmanchement à « contre-collet », c'est le contraire : le collet a tendance à « se refermer » à l'emmanchement et à « s'ouvrir » au démanchement, d'où des efforts de démanchement toujours inférieurs à ceux d'emmanchement – cf Figure 4.

## 2.3 Influence de la cataphorèse sur le procédé d'emmanchement

### 2.3.1 Constatations expérimentales

Les essais comparatifs à géométrie donnée de deux séries de pièces emmanchées avec des collets soit nus, soit recouverts de sa cataphorèse, ont montré que la présence de cataphorèse augmente considérablement les efforts d'emmanchement et de démanchement et modifie la corrélation entre les deux efforts. La première hypothèse est une augmentation du coefficient de frottement avec cataphorèse au lieu d'acier nu en face du revêtement zinc-nickel. L'autre constat est une modification de la répartition du contact entre les deux pièces : la surface de frottement effective est plus grande lorsqu'on a de la cataphorèse.

### 2.3.2 Comportement de la cataphorèse

Au cours de l'emmanchement, la cataphorèse est déformée et endommagée ; on a noté deux modes d'endommagement observés au Microscope Electronique à Balayage : une abrasion progressive ou un arrachement à l'interface avec l'acier du collet. La cataphorèse est moins raide que les pièces et s'endommage, ce qui conduit à un assouplissement du contact, qui est pris en compte dans les simulations déjà présentées ci-dessus. On n'y impose pas à la surface extérieure de la pièce mâle d'être en contact exactement avec l'acier du collet mais on laisse une plage de distance possible de l'ordre de l'épaisseur de cataphorèse.

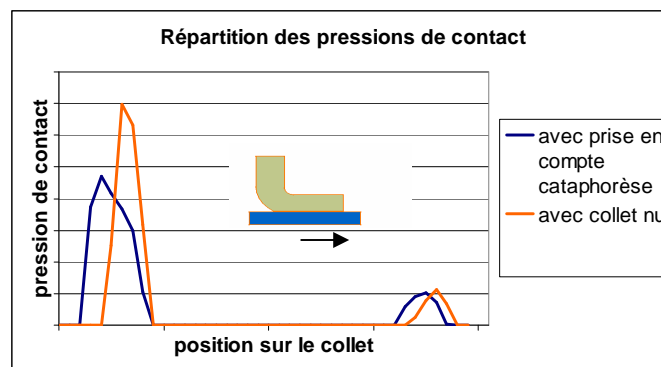


FIG. 5 – Simulations de la répartition du contact en fin d'emmanchement (sens collet) – effet de la matérialisation de la cataphorèse

La conséquence est une répartition du contact simulé plus étalée sur la longueur du collet comme cela semble être le cas expérimentalement (Figure 5). En effet, sans prendre en compte la cataphorèse, la pression de contact maximale dans l'âme est plus élevée mais l'effort d'emmanchement est plus faible.

## 2.4 Sensibilité aux paramètres

### 2.4.1 Sensibilité au serrage

Dans les plages de serrage considérées, l'augmentation du serrage induit :

- une augmentation de la déformation plastique de la cage métallique qui va dans le sens d'une augmentation de l'effort d'emmanchement
- des pressions de contact plus élevées mais sur une surface plus restreinte – surtout en « sens collet », et à l'extrême on ne retrouve de contact que dans l'âme du collet. L'effort peut alors diminuer.

Les simulations montrent que, à frottement constant, l'effort d'emmanchement est une fonction croissante du serrage, tandis que la courbe d'effort de démanchement en fonction du serrage comporte un maximum dont la position varie en fonction de la configuration (comme l'expérience sur la Figure 2). Le serrage a donc un impact majeur sur la corrélation emmanchement – démanchement puisque s'il est trop fort, il peut être défavorable à l'effort de démanchement.

## 2.4.2 Sensibilité au coefficient de frottement

La Figure 6 est un exemple d'emmanchement dans le « sens collet » où les points sont représentés dans le plan effort de démanchement en fonction de l'effort d'emmanchement. Les points expérimentaux en violet correspondent à des essais pour lesquels les cages ont été huilées pour certaines et dégraissées pour d'autres, afin de faire varier le coefficient de frottement. Au total, on obtient des dispersions importantes mais qui sont assez représentatives de la dispersion habituelle. La droite en noir correspond à la position effort d'emmanchement = effort de démanchement.

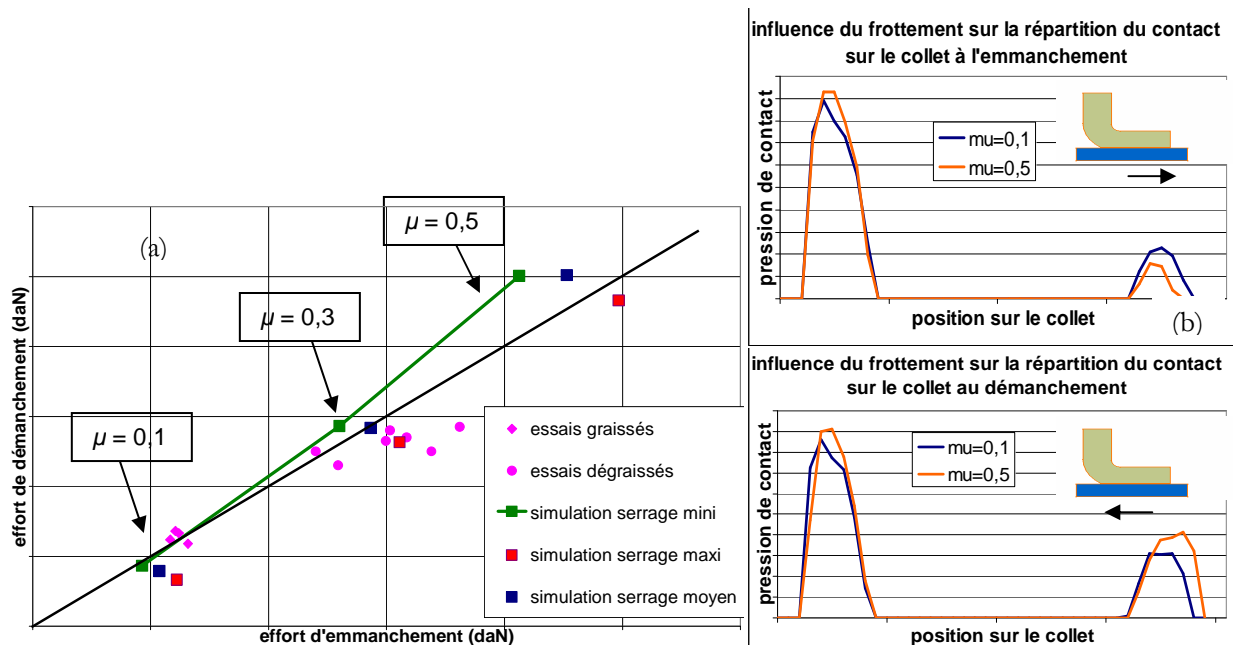


FIG. 6 – Emmanchement en « sens collet » - (a) comparaison expérience / calcul dans le plan effort d'emmanchement – effort de démanchement ; (b) répartition du contact le long du collet pour deux coefficients de frottement

Les résultats de simulation correspondent à différents serrages pour différents coefficients de frottement  $\mu$ . Il en ressort que :

- les effets du serrage sur les efforts sont de second ordre par rapport aux effets du coefficient de frottement et on a une certaine proportionnalité entre  $\mu$  et l'effort
- les essais graissés correspondent à un coefficient de frottement un peu plus élevé que 0,1 et les essais dégraissés correspondent à un coefficient de frottement autour de 0,3.

Les simulations de l'effet du coefficient de frottement représenté dans le plan effort d'emmanchement – effort de démanchement montrent une convexité de la courbe (Figure 6a) d'autant plus qu'on est à serrage faible, le frottement n'agit pas comme un simple coefficient de proportionnalité.

Cela reflète l'effet structure du coefficient de frottement : ce dernier conditionne l'effort tangentiel qui a un impact sur la déformation des pièces, du coup la répartition des pressions de contact en est affectée. Ainsi, en sens collet, à serrage constant, à l'emmanchement un coefficient de frottement plus élevé induit un contact

moins intense en extrémité de collet ( $\int_{\text{surface de contact}} P_c \cdot dS$  plus faible) alors qu'au démanchement le contact est plus intense si  $\mu$  augmente (Figure 6b). Ainsi, plus le coefficient de frottement est élevé, plus l'écart (effort de démanchement – effort d'emmanchement) est élevé.

« A contre-collet », pour la même raison, l'effet du frottement est inversé : l'intensité du contact augmente à l'emmanchement et diminue au démanchement quand  $\mu$  augmente, si bien que l'augmentation du coefficient de frottement creuse le déficit de l'effort de démanchement par rapport à l'emmanchement – cf Figure 7 qui présente une courbe concave.

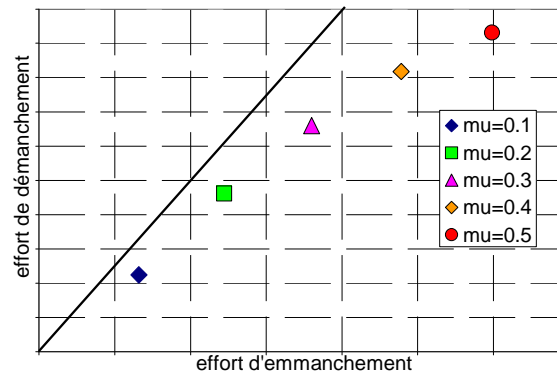


FIG. 7 – Emmanchement à « contre-collet » à serrage moyen - influence du coefficient de frottement sur les efforts dans le plan effort d'emmanchement – effort de démanchement

### 3 Conclusion

Dans les cas d'emmanchement dans des collets emboutis avec déformation plastique, le frottement a un effet structure différent selon le sens dans lequel on emmanche. La présence d'un revêtement organo-métallique sur le collet modifie le contact car il se déforme et est endommagé par le revêtement zinc-nickel de la pièce mâle rugueuse, ce qui peut générer des modifications du coefficient de frottement. Ce sont d'ailleurs deux points que nous nous attachons à étudier via des essais tribologiques : pour un point du collet les conditions de contact au cours de l'emmanchement se stabilisent rapidement alors que pour la surface de la pièce mâle – le frottement étant relativement ponctuel – on a surtout le passage d'un pic de pression. Par conséquent un essai de frottement pion revêtu de cataphorèse glissant sur une plaque revêtue de zinc-nickel s'avère particulièrement représentatif des problématiques de l'emmanchement (altération de la cataphorèse à pression constante et variation du frottement inhérente, réversibilité du frottement).

### References

- [1] Timoshenko, S.P. ; *Résistance des matériaux*, v 2, 1968, DUNOD Technique
- [2] Gamer, U. ; Lance, R.H. ; *Stress distribution in a rotating elastic-plastic tube*, Acta Mechanica, v 50, 1983, p 1-8
- [3] Croccolo, D. ; Cuppini, R. ; Vincenzi, N. ; *Friction coefficient definition in compression-fit couplings applying the DOE methods*, Strain, v 44, 2008, p 170-179
- [4] Manninen, T. ; Kanervo, K. ; Revuelta, A. ; Larkiola, J. ; Korhonen, A.S.; *Plastic deformation of solderless press-fit connectors*, Materials Science and Engineering, v 460-461, 2007, p 633-637S