



HAL
open science

Construction d'un élément fini d'interface homogénéisé pour prendre en compte l'effet de la rugosité dans la modélisation des assemblages frettés

H Boutoutaou, Jf Fontaine, Mohammed Bouaziz

► To cite this version:

H Boutoutaou, Jf Fontaine, Mohammed Bouaziz. Construction d'un élément fini d'interface homogénéisé pour prendre en compte l'effet de la rugosité dans la modélisation des assemblages frettés. 21ème Congrès Français de mécanique, Aug 2013, BORDEAUX, France. hal-01184611

HAL Id: hal-01184611

<https://hal.science/hal-01184611>

Submitted on 12 Mar 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Construction d'un élément fini d'interface homogénéisé pour prendre en compte l'effet de la rugosité dans la modélisation des assemblages frettés

H. BOUTOUTAOU^a, JF. FONTAINE^b, M. BOUAZIZ^c,

- a. Université M'hamed Bougara, Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, 35 000 Boumerdès, Algérie, hamidboutoutaou@yahoo.fr.
- b. Laboratoire d'Electronique, Informatique et Image, Université de Bourgogne, route des plaines de l'Yonne, 89 000 AUXERRE, France.
- c. Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Mécanique, 16200 El Harrach, BP 182, Algérie.

Résumé :

Le frettage est un procédé qui permet d'assembler deux pièces par serrage. Les méthodes de calcul traditionnelles considèrent ces pièces parfaites et ne prennent pas en compte leurs défauts géométriques (forme et états de surface). Ceci oblige généralement à utiliser des procédés onéreux pour obtenir ces surfaces. L'objectif des travaux présentés ici est de pouvoir intégrer le comportement de la micro géométrie des aspérités dans la modélisation des assemblages frettés. L'approche envisagée consiste à élaborer un élément d'interface présentant le comportement des aspérités. Le comportement de cet élément peut alors être défini par une relation entre son épaisseur (liée à la hauteur des aspérités) et la pression qui lui est appliquée. Un élément fini homogénéisé a été élaboré sur la base d'un comportement élastique isotrope transversalement. Ce comportement est identifié et validé sur la base de modélisations numériques. Une étude expérimentale sur des assemblages composés d'axes rectifiés en acier et de moyeux de formes extérieures circulaire et rectangulaire en duralumin, présentant divers niveaux de rugosité, serrage et défaut de forme, permet de vérifier la cohérence de l'approche. Les résultats obtenus sont globalement satisfaisants.

Mots clés : assemblages frettés, éléments finis, modélisation du contact, rugosité, usinage

Abstract:

The shrink fit is a process for assembling two parts with tightening. The traditional calculation methods consider these pieces perfect and do not take into account their geometrical defects (shape and roughness). This generally requires the use of expensive processes to obtain these surfaces. The aim of the work presented here is to integrate the behavior of the micro roughness geometry in modeling an assembly of industrial parts with complex geometry. The proposed approach is to develop an interface element with the behavior of the asperities. The behavior of this element can then be defined by a relationship between the thickness (related to the height of the asperities) and the pressure applied to it. Homogenized finite element has been developed on the basis of transversely isotropic elastic behavior. This behavior is identified and validated with numerical modeling. An experimental study on assemblies composed of rectified steel shafts and hubs outward forms circular and rectangular duralumin, with different levels of roughness, tightening and form defect, is carried out to check the consistency of the approach. The obtained results are generally satisfactory.

Keywords: shrink fit, finite element, modeling of contact, roughness, machining

1 Introduction

La technique de frettage est de plus en plus employée du fait des développements des moyens de calculs et des outils de modélisation. Cependant, on ne dispose à ce jour que d'un unique modèle de calcul basé sur la théorie des tubes épais qui considère que les surfaces en contact sont parfaitement lisses ; ceci oblige donc à les spécifier de manière très précise [1]. Toutefois, les normes [2] indiquent que la perte de serrage due à la rugosité peut être estimée en fonction de la rugosité arithmétique des deux surfaces en contact. Cette hypothèse est empirique et n'a à priori aucun fondement scientifique. Modéliser les aspérités par un maillage fin n'est pas compatible avec la complexité des pièces développées par l'industrie. De précédents travaux sur la prise en compte de l'état de surface dans la résistance des assemblages frettés ont montré d'une part l'importance du comportement de celui-ci mais d'autre part la limite d'une telle approche à une géométrie simple [3]. Il est donc nécessaire d'introduire le comportement des aspérités à un niveau macroscopique pour avoir une modélisation compatible avec la complexité des assemblages industriels [4]. Le modèle de contact classique, basé sur les conditions de Signorini, reste un modèle théorique éloigné des conditions réelles car les aspérités ne sont pas prises en compte. De nombreux auteurs se sont penchés sur le problème complexe de résolution du contact par la méthode des éléments finis. Les techniques employées reposent sur la méthode de pénalisation [5], la méthode des multiplicateurs de Lagrange [6], ou la méthode d'homogénéisation [7], [8]. Intégrer directement le comportement des aspérités dans de telles lois de contact est une idée intéressante, cependant, les sollicitations du frettage diffèrent de celles d'un problème d'indentation, il est donc nécessaire de faire intervenir le mode de sollicitation à l'interface de chaque pièce en contact. L'idée d'élaborer un élément qui décrit le comportement micro-géométrique des aspérités et le transcrire au niveau macro-géométrique a été donc choisie.

2 Elaboration de l'élément de contact rugueux homogénéisé

Afin d'élaborer l'élément de contact rugueux homogénéisé, une série de modélisations axisymétriques pour étudier et déterminer la zone affectée par le comportement des aspérités ont été utilisées. Pour simplifier le problème, l'axe a été supposé sans défaut. Les paramètres caractéristiques de la rugosité de l'alésage ont été choisis pour représenter au mieux les différentes typologies du profil: la rugosité moyenne R_z , au sens de la norme ISO 25178-2 [9], le pas de rugosité moyen A_R , et la forme du profil. Ces paramètres sont compatibles avec la définition des critères d'états de surface par rapport à la ligne enveloppe plus adaptée à la spécification des assemblages [10]. Trois formes ont été choisies : une forme linéaire (en \mathbf{Z}), une forme en U et une forme en U inversé \cap . Le logiciel Abaqus® a été utilisé pour effectuer la modélisation. La figure 1 représente le maillage et la cartographie des contraintes de Von Mises résultantes pour le cas de l'assemblage d'un axe en acier et d'un moyeu en duralumin. Le rayon moyen r_M de l'alésage est égal à 8 mm, le rayon extérieur $R_b=20\text{mm}$ et les paramètres du profil sont : profil linéaire en (\mathbf{Z}), $A_R=100\ \mu\text{m}$, $R_z=10\ \mu\text{m}$ et un serrage Δ_M au sens de l'enveloppe au maximum de matière égal à $2\ \mu\text{m}$. On constate que la zone affectée par les aspérités est très réduite et se concentre principalement au niveau des pics ; sur le reste de l'ensemble du moyeu, les contraintes ne dépendent plus des aspérités. On peut donc considérer que les aspérités n'ont plus d'influence à une certaine distance de l'interface. La figure 2, indique l'évolution de la pression et de la contrainte de Von Mises à l'interface de contact pour les cas avec et sans aspérités. Par rapport au cas parfait, les aspérités modifient le comportement à l'interface de contact, créant des surfaces de contact réduites fortement sollicitées (pics) et des surfaces de non contact (vallées) de très faibles sollicitations.

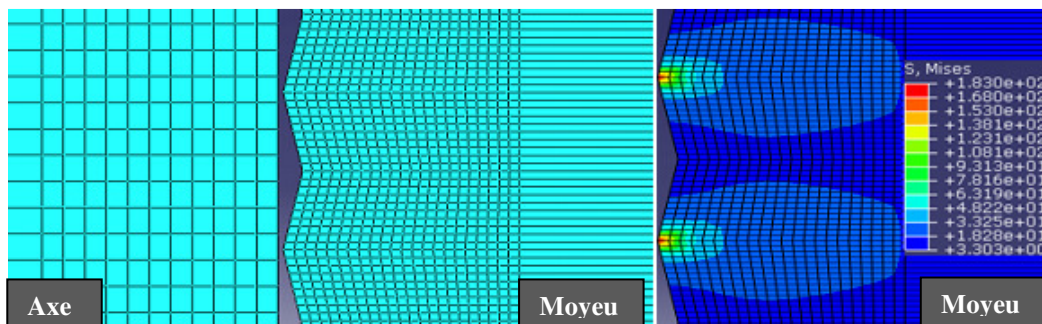


FIG.1- Maillage de l'interface des deux éléments et cartographie des contraintes de Von Mises résultantes

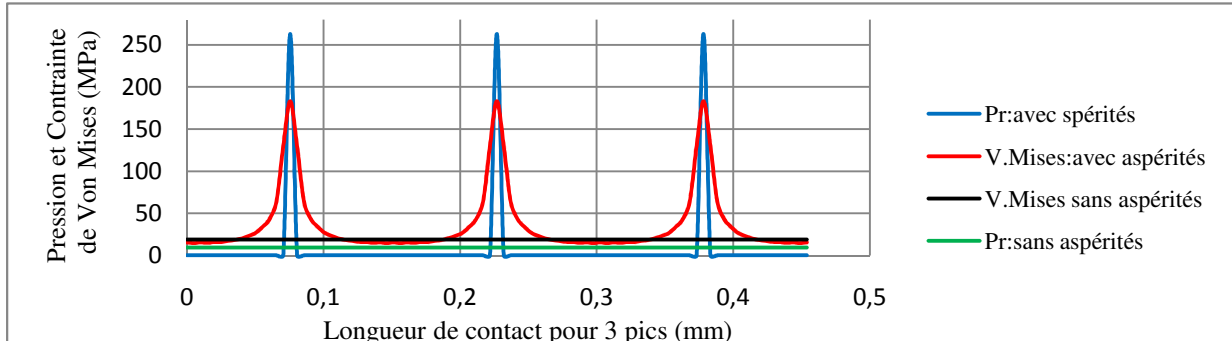


FIG.2- Evolution de la pression et de la contrainte de V. Mises pour les cas : avec et sans aspérités

2.1 Influence des paramètres géométriques de la rugosité

L'influence des paramètres géométriques de la rugosité sur le comportement de l'assemblage est représentée par les courbes ci-après. La figure 3, montre l'influence de la forme du profil sur les valeurs de la contrainte de Von Mises, la pression de contact et la résistance de l'assemblage. La figure 4, indique la sensibilité du comportement de l'assemblage aux valeurs du pas moyen de rugosité. Plus le pas augmente, plus la contrainte et la pression maximales augmentent. Pour des valeurs importantes du pas, l'écart entre la contrainte et la pression devient important et leurs valeurs diminuent sous l'effet de la plasticité au niveau des pics. On remarque aussi une perte sensible de résistance de l'assemblage lorsque le pas augmente.

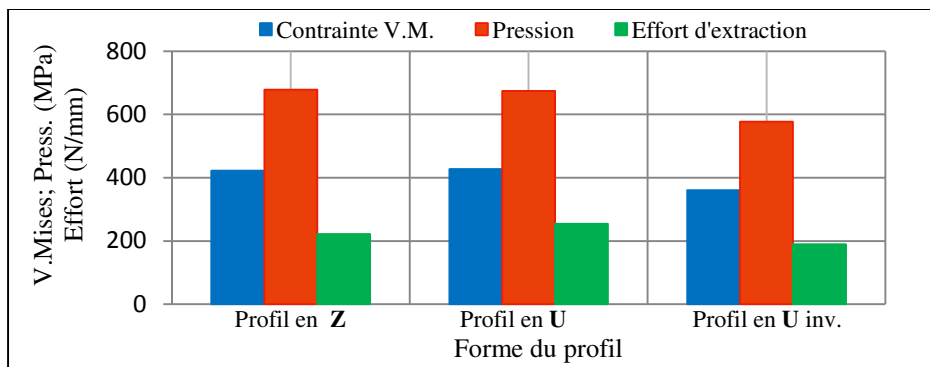


FIG.3- Valeurs maximales de la contrainte de Von Mises, de la pression et l'effort d'extraction en fonction de la forme du profil de rugosité

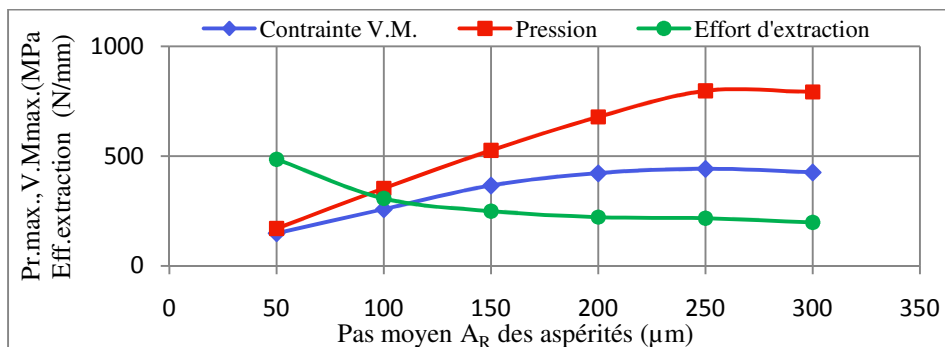


FIG.4- Evolution de la contrainte de Von Mises, de la pression maximale et de l'effort d'extraction en fonction du pas moyen A_R du profil

Sur la figure 5 ci-dessus, on remarque que la pression de contact et son écart par rapport à la contrainte de Von Mises deviennent plus importants lorsque la valeur de R_z augmente, cela est du principalement au serrage et à l'écroutissage importants produits par la valeur de R_z . Cette dernière augmente beaucoup la résistance de l'assemblage. Les résultats de cette pré-étude ont permis de constater que les trois paramètres géométriques de rugosité influencent le comportement des assemblages frettés. Dans

tous les cas on peut estimer que cette influence est relativement limitée à une zone proche de l'interface (voir figure 1). L'épaisseur de l'élément peut être dix fois supérieure à la rugosité moyenne.

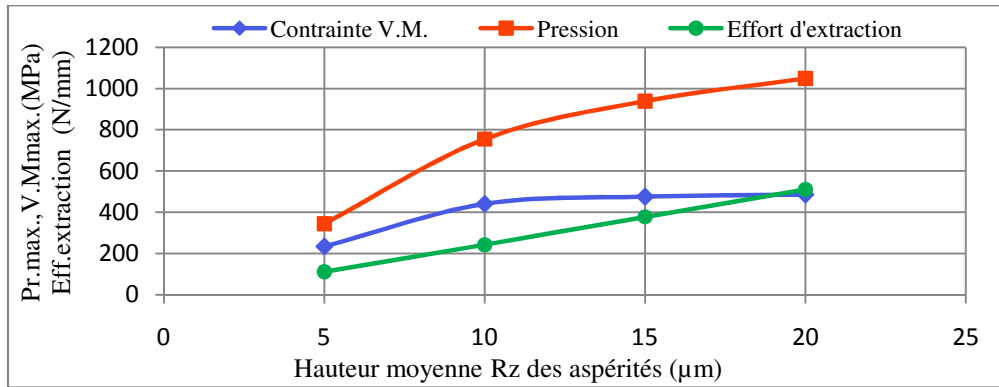


FIG.5 - Valeurs de la contrainte de Von Mises, de la pression maximale et de l'effort d'extraction en fonction de la hauteur moyenne R_z du profil

2.2 Modélisation numérique du comportement de l'élément homogénéisé

Une étude antérieure a montré que la présence de défauts de forme dans le moyeu ou l'axe modifie l'état de contraintes à l'interface [11]. L'état de contraintes n'est donc forcément équivalent à celui du cas parfait. Les sollicitations appliquées sur les bords de l'élément sont une pression dans la direction radiale et une tension ou une compression dans la direction circonférentielle. Dans la direction axiale, les hypothèses de contraintes planes ou de déformations planes peuvent être effectuées. Afin de bien prendre en compte les mêmes conditions de contact que l'élément in situ dans l'assemblage fretté, la pression est donnée par un poinçon rigide et la hauteur de l'élément correspond à l'épaisseur de l'élément homogénéisé. La figure 6 montre le maillage construit sur la base d'éléments linéaires de type hexaédrique C3D8R utilisés pour simuler le comportement de l'élément in situ. Les dimensions globales des deux éléments sont : $(300 \times 50 \times 150) \mu\text{m}$ pour le poinçon rigide et $(300 \times 50 \times 100) \mu\text{m}$ pour l'échantillon. Les étapes de simulation sont les suivantes :

- 1^{ère} étape : Mise en contact du poinçon et de l'échantillon par un déplacement imposé,
- 2^{ème} étape : application de la pression jusqu'à une valeur de 5 MPa,
- 3^{ème} étape application de la contrainte circonférentielle d'une valeur de 5 MPa,
- Répétition des étapes 2 et 3 jusqu'à une valeur de pression maximale.

2.2.1 Identification de la loi de comportement de l'élément homogénéisé

Pour trouver la loi de comportement de l'élément d'interface, il faut exprimer l'évolution des déformations de l'élément en fonction des paramètres du chargement. La quantification de ces déformations est obtenue selon la définition suivante : l'élément homogénéisé s'inscrit dans un parallélépipède qui se déforme en suivant l'élément réel (voir figure 6) et subi des déformations homogènes. Les déformations radiales, circonférentielles et axiales, sont obtenues comme suit :

$$\varepsilon_{rr} = \frac{(e(p) - e_0)}{e_0}, \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{(l(p) - l_0)}{l_0}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{(L(p) - L_0)}{L_0} \quad (1)$$

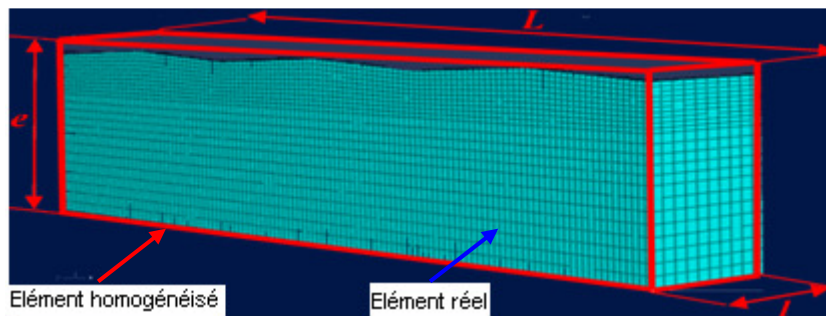


FIG. 6 - Élément réel avec aspérités (en bleu) et élément homogénéisé (en rouge)

La figure 7 montre que les déformations radiales de l'élément sont plus importantes que les déformations circonférentielle ; cela signifie donc que l'élément homogénéisé est anisotrope. L'hypothèse d'une isotropie transverse est raisonnable car la texture du défaut n'influence pas à priori les caractéristiques mécaniques dans le plan (circonférentiel-axial). La relation entre les déformations et les contraintes dans le cas d'isotropie transverse est obtenue par le système (2) ci-dessous.

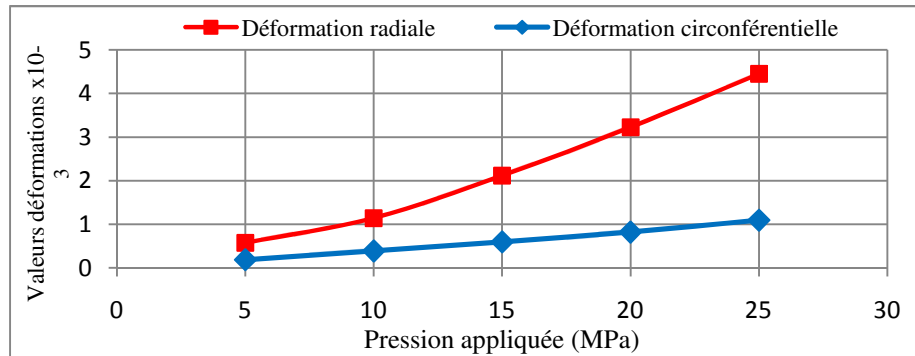


FIG. 7 - Variation de la déformation dans les directions « radiale » et « circonférentielle » (cas $R_Z=4 \mu\text{m}$, $A_R=100 \mu\text{m}$ et profil triangulaire en Z).

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{rr} \\ \epsilon_{\theta\theta} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{r\theta} \\ \epsilon_{rz} \\ \epsilon_{\theta z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_l & -\nu_{tl}/E_t & -\nu_{tl}/E_t & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{lt}/E_l & 1/E_t & -\nu_{tt}/E_t & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{lt}/E_l & -\nu_{tt}/E_t & 1/E_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2G_{lt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2G_{lt} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1+\nu_{tt})/E_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{r\theta} \\ \sigma_{rz} \\ \sigma_{\theta z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Cinq paramètres indépendants sont à déterminer, soient : E_l et E_t , modules d'Young, respectivement dans la direction l (radiale in situ) et dans la direction transversale t , ν_{lt} , et ν_{tt} coefficients de Poisson dans les différents plans avec $\nu_{lt}/E_l = \nu_{tl}/E_t$ et G_{lt} , module de cisaillement. Les valeurs de ces constantes élastiques sont calculées en effectuant des modélisations avec plusieurs cas de charge.

3 Modélisation du frettage avec prise en compte de l'élément homogénéisé

Pour valider notre démarche par rapport à la réalité physique, nous avons effectué des essais d'extraction ainsi que des modélisations correspondant aux divers cas d'échantillons présentant des défauts de forme et d'état de surface. Le but de ces essais et simulations est de déterminer l'influence de l'état de surface sur la résistance à l'extraction des assemblages frettés. Les résultats trouvés sont récapitulés dans le tableau 1. Il résume trois essais avec un moyeu de forme extérieure rectangulaire (R1L03, R1L04 et R4L03) et un essai avec un moyeu de forme extérieure circulaire (C0L05). On remarque que l'effort calculé avec le modèle intégrant la rugosité a tendance à être réduit par rapport aux cas considérés parfaitement lisses. Ceci correspond bien à une perte de serrage.

TAB. 1- Comparaison des valeurs de résistance à l'extraction expérimentales et calculées avec ou sans prise en compte de l'élément homogénéisé

Cas	Hauteur moyenne R_Z (μm)	Pas moyen A_R (μm)	Epaisseur homogénéisée e_h (μm)	Défaut de forme ϵ_f (μm)	Serrage relatif ($\Delta\%$)	Effort d'extraction expérimental (N)	Effort d'extraction modélisé sans aspérités (lisse) (N)	Effort d'extraction modélisé avec homogénéisation (N)
C0L05	8	16	100	26	0,18	2250	2327	2236
R1L03	9	286	100	34	0,5	6000	6600	5986
R3L03	4	286	100	51	0,6	6400	6700	6679
R4L03	22	86	200	62	0,7	7200	7828	7058

4 Conclusion

Nous avons montré la faisabilité de la prise en compte de l'état de surface de manière simple par une technique d'homogénéisation numérique dans le cadre du comportement d'un assemblage obtenu par frettage. Cette approche permet de modéliser l'influence de la rugosité dans une modélisation de pièces industrielles qui présentent généralement des géométries complexes. L'absence de grand glissement permet de prendre en compte une loi de comportement élastique isotrope transverse de la zone homogénéisée. Dans la plupart des cas si le serrage relatif reste dans les limites conventionnelles en présence de défaut de forme faibles, le modèle élastique est acceptable car, même si les aspérités deviennent rapidement plastiques, leur comportement a relativement peu d'influence sur la pression moyenne (macro-grandeur qui caractérise la résistance de l'assemblage). Nous avons effectué l'identification de la loi homogénéisée de manière numérique. Celle-ci dépend des paramètres tels que l'amplitude moyenne et le pas moyen de rugosité mais aussi de la forme du profil. L'épaisseur de l'élément homogénéisé est une donnée importante à maîtriser elle doit être environ dix fois supérieure à la rugosité moyenne. Les résultats obtenus avec la méthode proposée sont améliorés par rapport à la méthode classique. Cette approche simple peut être utilisée par les bureaux d'études industriels pour optimiser leurs assemblages frettés.

Références

- [1] Norme ISO 25178-2, Geometrical Product Specifications (GPS) - État de surface : surfacique – Part2 : termes, définitions et paramètres d'états de surface, AFNOR 2008
- [2] NF E22-621, Assemblage frettés, dimensions, tolérances et états de surface pour assemblages, AFNOR, Paris la défense
- [3] G. M Yang., Influence de l'état de surface sur les caractéristiques d'un assemblage fretté: un nouveau modèle pour calculer les caractéristiques des emmanchements en prenant compte de l'état de surface. Thèse de l'ENSAM., France, 1998.
- [4] Yang G.M., Coquille J.C., Fontaine J.F., Lambertin M., Influence of Roughness on Characteristics of Tight Interference Fit of a Shaft and a Hub, Int. J. of Solids and Struc., (2001), Vol 38/42-43, 7691-7701
- [5] Bathe K.J., Bouzinov P.A., on the constraint function method for contact problems, Comput. struct., (1997), 64, 5-6 , 1069 -1085
- [6] Simo J. C., Wriggers P., Taylor R. L., A perturbed Lagrangian formulation for the finite element solution of contact problems, Comput. Meth. Appl. Mech. Engng., (1985) 51, 163-180
- [7] Passieux J.C., Approximation radiale et méthode LATIN multi-échelle en temps et espace, Phd ENS de Cachan, 1er décembre 2008, Cachan, France
- [8] Belghith S., Meslini S., BelhadjSalah H., Ligier J.L., Modeling of contact between rough surface using homogenization technique, C. R. Mécanique, 338 (2010), 48-61.
- [9] Norme ISO 25178-2, Geometrical Product Specifications (GPS) - État de surface : surfacique – Part 2 : termes, définitions et paramètres d'états de surface, AFNOR 2008
- [10] Norme NF EN ISO12085, Geometrical Product Specifications (GPS) Etat de surface : Méthode du Profil Paramètres liés aux motifs, 03- 1998
- [11] Boutoutaou H., Bouaziz M., Fontaine J.F., Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account, Materials and Design 32 (2011); 3692–3701