

Analyse géométrique d'un assemblage fretté sous déformation pour une géométrie complexe

Q. Bourget^{1,2}, T. Balan¹, F. Cusenza², E. Becker¹, T. Demol³

¹ Arts et Metiers Sciences et Technologies, Université de Lorraine, LCFC, F-57070 Metz, France

² Framatome, 2 Rue Louis Alphonse Poitevin, 71380 Saint Marcel, France

³ Framatome, 1 Place Jean Millier, 92084 Paris la Défense, France

Résumé — Cet article étudie le comportement d'un assemblage fretté-soudé ayant une géométrie complexe. Le besoin de précision pour évaluer une quantité fine, le serrage, implique de développer de nouvelles méthodes facilitant l'interprétation physique. Le post-traitement des résultats dans un repère cylindrique local apparaît comme un repère naturel, permettant d'évaluer localement les distances de l'interface à l'axe du tube. L'application de ce traitement au cas de l'assemblage après contact donne de bonnes perspectives quant à l'utilisation de ces méthodes sur des chargements plus complexes.

Mots clés — Frettage, Simulation numérique 3D, Repère cylindrique local.

1 Introduction

Dans la centrale nucléaire, la réaction se produit dans la cuve et est pilotée depuis l'extérieur par les mécanismes de commandes agissant à l'intérieur. Le passage de ces mécanismes de l'extérieur à l'intérieur de la cuve, se situe au niveau des adaptateurs de traversée. Ces adaptateurs sont reliés au couvercle par une liaison frettée-soudée, caractérisée par un rayon nominal r_1 et $r_1 + \delta$ de l'alésage du couvercle et du tube, respectivement. Le manque de connaissance sur le comportement du frettage entraîne une soudure dimensionnée pour assurer la tenue de l'assemblage à elle seule. Comprendre l'apport de la partie frettée permettrait d'améliorer les marges de sécurité et l'efficacité des conceptions. L'évaluation de la tenue du frettage est délicate car la géométrie de l'interface entre le tube adaptateur et le couvercle varie selon le tube étudié. La position du tube influence la réponse aux conditions de chargements en pression interne et en température.

La tenue du frettage est largement modélisée dans la littérature via le modèle de Coulomb, à partir de la pression de contact et du coefficient de frottement [1, 2, 3]. Le coefficient de frottement dépend d'une multitude de paramètres pouvant se coupler, sa modélisation est très complexe, et des approches expérimentales sont souvent privilégiées pour le déterminer. Les études de Lewis [4, 5] ont montré de bonnes corrélations entre les pressions de contact obtenues expérimentalement par des méthodes ultrasoniques, et celles obtenues analytiquement et numériquement via la méthode des éléments finis. Cependant, des études ont cherché à comparer les prédictions d'efforts d'arrachement obtenues numériquement et analytiquement à ceux obtenus expérimentalement [6]. Il s'avère que les prédictions numériques montrent de meilleurs concordances avec les valeurs expérimentales que les prédictions analytiques. En effet, Allam et Bazergui en modifiant le sens de l'effort appliqué (effort de traction ou de compression) ont observé que la direction impactait la valeur d'arrachement. Ainsi, un essai en compression comprime le tube, ce qui a tendance à le gonfler radialement et ainsi augmenter la pression de contact. A l'inverse, un essai en traction a tendance à allonger le tube, entraînant ainsi une diminution de la pression de contact. Ces effets ne sont pas pris en compte par les modèles utilisant une pression de contact sans sollicitation, qui prédit alors un effort d'arrachement entre les valeurs obtenues en traction et en compression. Connaître la distribution de la pression de contact après assemblage donne cependant une première idée de l'effort d'arrachement.

La littérature ne semble pas avoir traité un assemblage où la bague est de forme sphérique, où l'interface n'est pas axisymétrique et ne possède pas de plan de symétrie orthogonal à l'axe du tube. De premiers calculs montrent que lorsque le couvercle est mis sous pression, les alésages se déplacent et se déforment de valeurs non négligeables devant la dimension du serrage. Ne pas considérer ces transformations en-

traint de mauvaises interprétations géométriques des résultats. Il est alors nécessaire de se doter de méthodes permettant de pouvoir quantifier les mouvements et déformations d'ensemble, afin de permettre une interprétation physique des résultats pour comprendre le comportement de l'assemblage. Cette étude cherche alors à disposer d'outils pertinents pour étudier le comportement du frottement entre un tube périphérique et le couvercle de cuve. Pour faciliter l'étude, la géométrie étudiée est simplifiée et composée de quatre tubes, voir Figure 1. En effet, les symétries et périodicités géométriques de cette géométrie particulière permettent de se ramener à l'étude d'un huitième de l'assemblage. Ces outils devront permettre d'évaluer quantitativement l'évolution de la forme du tube et de son déplacement d'ensemble.

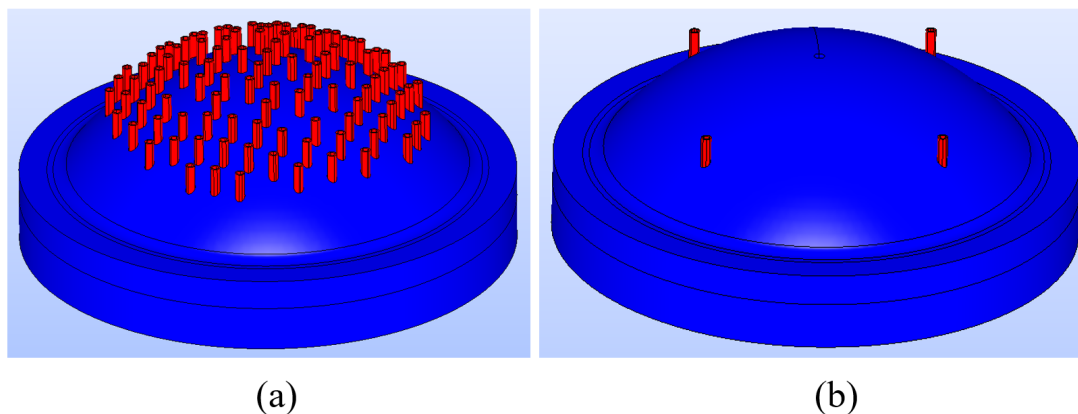


FIGURE 1 – Couvercle de cuve (en bleu) avec les tubes adaptateurs (en rouge) : (a) Géométrie complète et (b) Configuration étudiée

2 Matériaux et Méthodes

2.1 Modèle

La géométrie étudiée étant complexe, une approche par simulations numériques utilisant la méthode des éléments finis est privilégiée, le maillage utilisé est représenté Figure 2. Les conditions de symétrie sont représentées en bloquant les déplacements normaux sur les faces concernées. Les déplacements axiaux du couvercle sont bloqués sur le bord externe. La soudure est représenté en superposant, puis en liant, les nœuds de l'interface du tube et du couvercle sur la zone soudée. Le tube est modélisé avec un alliage base nickel et le couvercle en acier ferritique, où les caractéristiques mécaniques sont extraites du RCC-M [7]. Les calculs sont réalisés dans le domaine élastique, les modules d'Young utilisés sont 218.2GPa pour le tube et 204GPa pour le couvercle. Les matériaux partagent un même coefficient de Poisson de 0.3. Les calculs sont effectués en utilisant les outils de *Code_Aster*, et utilisent ici un lagrangien stabilisé pour traiter le calcul du contact.

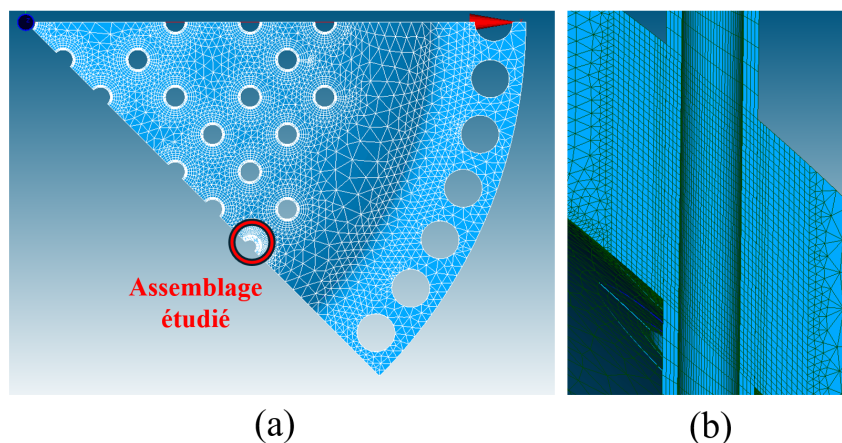


FIGURE 2 – Maillage étudié : (a) Vue globale et (b) Zoom sur l'interface

2.2 Détermination d'un système de coordonnées pertinent

La forme cylindrique du tube incite naturellement à se tourner vers un système de coordonnées cylindriques. Cependant, l'axe du tube ne passant pas par le centre de la sphère représentant le couvercle de cuve, la mise sous chargements de ce couvercle induit notamment des déplacements radiaux du tube. De plus, la forme complexe de l'interface entre le tube périphérique et le couvercle entraîne des déformations de cet axe, qui évolue au cours de la transformation. Par ailleurs, la pression de contact étant très sensible au serrage, δ , il est intéressant de pouvoir quantifier des évolutions de rayon de l'ordre du serrage, au cours de la transformation. Or le serrage est de dimension très petite, de l'ordre de 1 000 fois plus faible que le rayon du tube. Il est donc nécessaire d'avoir des outils d'analyse capables d'évaluer les évolutions géométriques avec une bonne précision.

Pour analyser l'interface, ce travail propose d'utiliser un système de coordonnées cylindriques locales, où l'axe du repère correspond à l'axe du tube après transformation.

La détermination de cet axe se fait en suivant les étapes suivantes :

1. Ajout de points virtuels sur l'interface, formant des sections orthogonales à l'axe initial du tube, voir Figure 3
2. Détermination des positions transformées des points ajoutés
3. Calcul du barycentre de chaque section, donnant alors des points de passage de l'axe transformé
4. Extrapolation des barycentres calculés après transformation, donnant alors une approximation de l'axe transformé et servant ici d'axe du repère cylindrique local

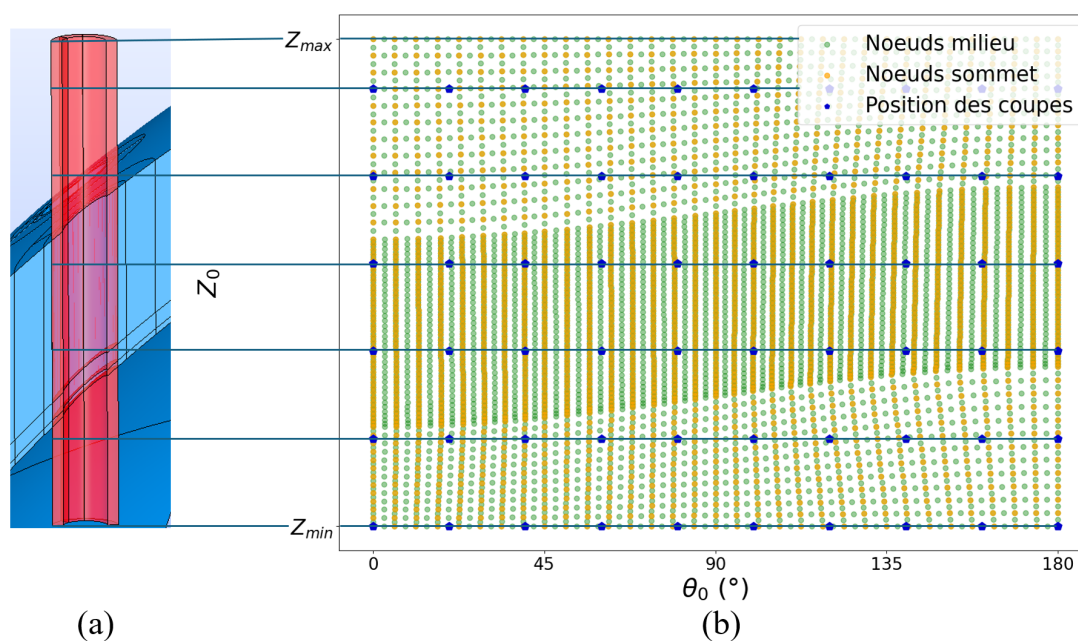


FIGURE 3 – Illustration de l'ajout de sections virtuelles : (a) Position sur l'assemblage et (b) Position sur une vue 2D

Il est à noter que pour chaque hauteur, le barycentre calculé est celui de la courbe déterminée en reliant les points virtuels ajoutés.

3 Résultats et Discussion

Cette partie cherche à appliquer la méthode d'analyse proposée précédemment au cas du tube périphérique après sa mise en contact avec le couvercle.

La Figure 4a indique la position de l'axe calculé avec la méthode précédente, et la figure 4b montre la forme de l'assemblage lorsque la déformée est amplifiée d'un facteur 500. Ces figures montrent toutes deux que la mise en contact du tube entraîne une légère rotation et une déformation selon une forme en s du tube. La figure 4a donne, en plus, une information quantitative sur le déplacement global du tube.

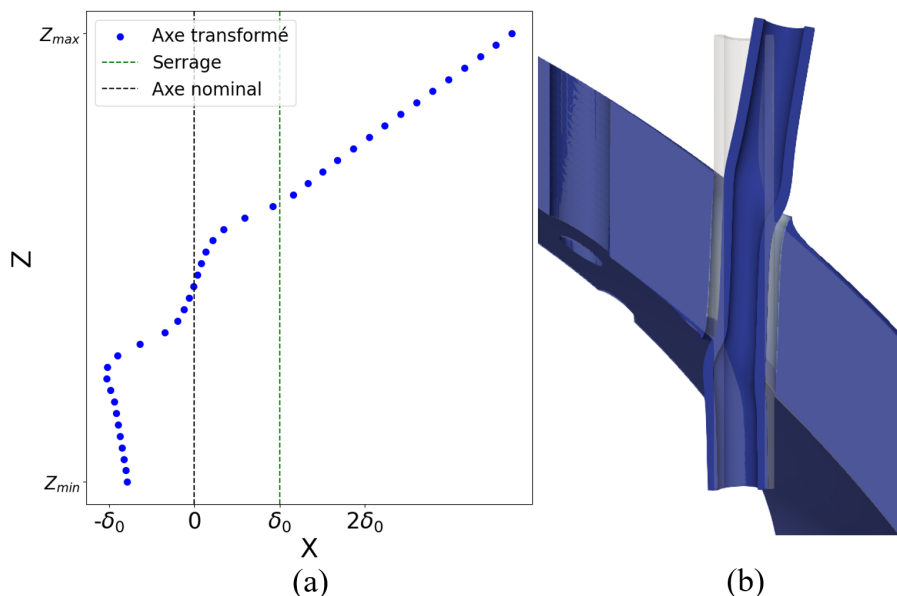


FIGURE 4 – Visualisation après contact : (a) Position de l’axe transformé du tube dans le repère global et (b) Visualisation de la géométrie initiale de l’assemblage (en beige) et de la déformée du tube amplifiée d’un facteur 500 (en bleu)

Les Figures 5a et b montrent la distance des nœuds du tube et de la bague par rapport à l’axe calculé précédemment. La Figure 5c indique l’état de contact sur les nœuds de la bague : les valeurs en jaune traduisent un état de contact entre le tube et la bague, les valeurs en violet traduisent un jeu positif entre les pièces, qui ne sont alors pas en contact. Ces figures sont complémentaires : là où le contact est détecté, les rayons du tube et de la bague sont identiques et différent sur les zones de non contact, avec un rayon de bague supérieur à celui du tube. Les Figures 4a et b informent aussi sur la forme de l’interface. En effet, à une hauteur fixée, l’évolution circonférentielle du rayon traduit une ovalisation de l’interface. Dans cet exemple, le rayon calculé dans la zone à 90° est plus faible que dans les zones à 0° et 180° , donnant ainsi le sens d’ovalisation de l’assemblage.

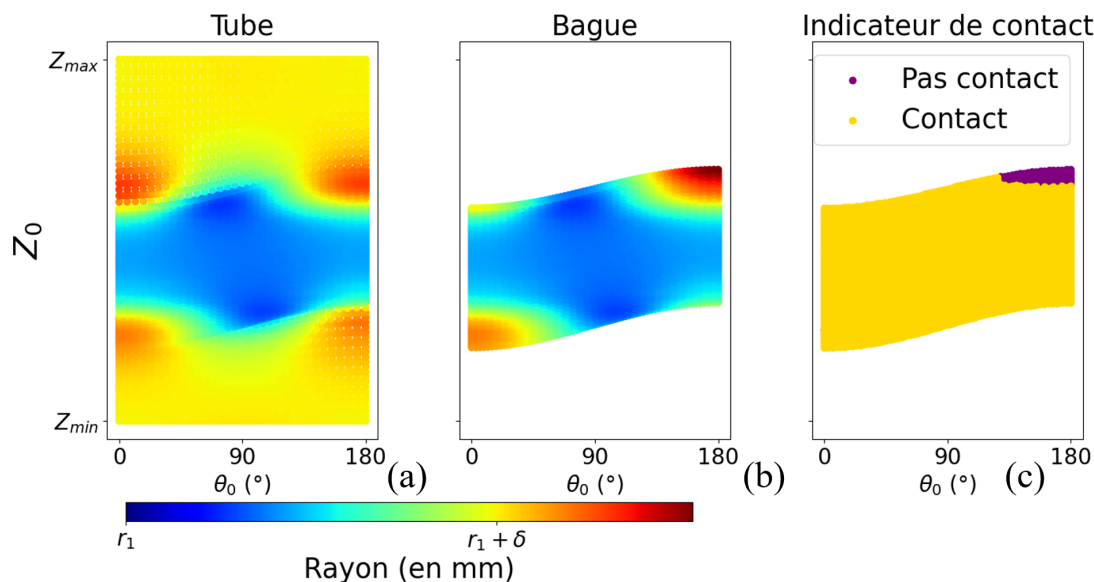


FIGURE 5 – Étude de l’interface après mise en contact : a) Rayon des nœuds du tube, b) Rayon des nœuds de la bague et c) Indicateur de contact

4 Conclusion

Cette étude a cherché à estimer le comportement de l'interface d'un tube périphérique et du couvercle liés par une liaison frettée-soudée. La géométrie de cet assemblage étant complexe, une étude numérique réalisée avec la méthode des éléments finis sur un modèle 3D a été proposée. L'axe du tube variant au cours de la transformation, il a été nécessaire de se doter de méthodes permettant d'analyser des évolutions géométriques de l'ordre du serrage. L'analyse des résultats se fait alors dans un repère cylindrique local, où l'axe du repère correspond à celui de la surface extérieure du tube, après déformation. La forme du maillage étant imposée par celle de l'interface tube-calotte, cet axe est calculé à partir de l'ajout de sections virtuelles, orthogonales à l'axe initial. Ces outils ont été testés après mise en contact du tube et du couvercle, les résultats montrent de bons accords entre la visualisation des déformées et les réponses quantitatives du traitement réalisé. La méthode donne accès à l'évolution des rayons du tube et de l'alésage du couvercle, informant sur ses valeurs et formes. Les rayons ainsi obtenus sont cohérents avec les états de contact à l'interface, donnant ainsi une information quantitative supplémentaire.

4.1 Références bibliographiques

Références

- [1] M. McMillan, J.L. Hendry, A. Woolley, M.J. Pavier, *Measurement of partial slip at the interface of a shrink fit assembly under axial load*, Experimental Mechanics, Springer, page407-page415, 2018.
- [2] J.D. Booker, C.E. Truman, *Measuring the coefficient of friction for use in shrink-fit calculations*, Experimental Techniques, Springer International Publishing Cham, page7-page13, 2011.
- [3] P.J. Blau, *The significance and use of the friction coefficient*, Tribologie International, Elsevier, page585-page591, 2001.
- [4] R. Lewis, M.B. Marshall, R.S. Dwyer-Joyce, *Measurement of interface pressure in interference fits*, Journal of Mechanical Engineering Science, SAGE Publications, page127-page139, 2005.
- [5] R. Lewis, A. Yoxall, M.B. Marshall, *Comparison of numerical and ultrasonic techniques for quantifying interference fit pressures*, Journal of Mechanical Engineering Science, SAGE Publications, page1125-page1130, 2008.
- [6] M. Allam, A. Bazergui, *Axial strength of tube-to-tubesheet joints : Finite element and experimental evaluations*, Journal Pressure Vessel Technologies, page22-page31, 2002.
- [7] RCC-M, *Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires REP*, AFECN, 2020.