

# Stratégies de modélisation des assemblages boulonnés avec éléments technologiques soumis à un chargement excentré

A. Fau<sup>1</sup>, A. Daidié<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, CNRS, INSA, UPS, ISAE-SUPAERO, IMT Mines Albi, 3 Rue Caroline Aigle, Toulouse, France, a\_fau@insa-toulouse.fr – daidie@insa-toulouse.fr

**Résumé** — Les assemblages par éléments filetés représentent la majorité des assemblages mécaniques de par leur propriété de démontabilité. En fonction de l'orientation du chargement mécanique, des stratégies de modélisation et de dimensionnement adaptées doivent être appliquées. Dans le cas des assemblages soumis à un chargement excentré, la flexion de la vis doit être considérée. Son niveau d'influence dépend de la conception de l'assemblage et des éléments technologiques localisés au droit de la liaison (entretoise, joint, filets rapportés, etc.). Une modélisation simplifiée intégrant ces éléments est proposée.

**Mots clefs** — Assemblage boulonné, chargement excentré, précharge.

## 1. Introduction

Les assemblages boulonnés sont un composant essentiel des structures mécaniques. Ils sont omniprésents dans de nombreux secteurs d'activité, notamment dans le domaine des transports (ferroviaire, aéronautique, spatial, etc.). La réponse de la structure étant dépendante du comportement fortement non-linéaire de l'assemblage, le dimensionnement et l'analyse des structures assemblées nécessitent de considérer chaque liaison pour être fiables et représentatifs. Dans le cas des assemblages multifixations, une modélisation complète et détaillée de chaque boulon s'avère cependant trop coûteuse en temps de mise en œuvre et en temps de calcul. Afin d'assurer la représentativité des modèles numériques développés, des stratégies de simplification du boulon sont proposées. Ces dernières dépendent de l'objectif auquel doit répondre le modèle. Dans une phase de pré-dimensionnement des assemblages, qui consiste à déterminer la position du boulon, sa géométrie et son matériau, des modèles simplifiés robustes, peu coûteux en temps de calcul, mais fortement prédictifs, sont plébiscités par les industriels. Ils doivent permettre de réduire drastiquement la durée et le coût de la phase de pré-dimensionnement. L'architecture de l'assemblage déterminée en première approche est, par la suite, validée par des modélisations plus détaillées et complètes. Pour parvenir à réduire les temps de calcul tout en restant prédictif, des modélisations simplifiées de la liaison boulonnée sont proposées. Le comportement de la vis et de l'écrou sur la structure assemblée est traduit à travers un « connecteur » ou un « élément utilisateur ». L'approche retrouvée dans la littérature est un élément *poutre* enrichi. Belardi et al. proposent, par exemple, un « élément utilisateur » pour les liaisons dans les assemblages de pièces en matériaux composites [3]. L'enjeu est de pouvoir intégrer dans la poutre, non seulement le comportement du boulon, mais également des phénomènes physiques qui interviennent dans la zone entourant le boulon. En s'appuyant sur les travaux de Verwaerde [13], Lançon et al. incluent dans la poutre associée au comportement du boulon, la gestion du contact dans l'assemblage et son comportement non-linéaire permettant ainsi de diminuer fortement les temps de calcul, tout en conservant l'aspect critique lié aux interfaces de contact [9].

Dans cet article, un modèle simplifié appliqué aux assemblages boulonnés soumis à un chargement fortement excentré, dans la direction de l'axe de la vis et imposé à une distance  $m$  de l'axe de la vis, est proposé. L'étude porte sur le dimensionnement de structures boulonnées dont les fixations sont

implantées périodiquement sur des systèmes de brides cylindriques. Le comportement mécanique de ce type d'assemblage est, dans une première approche, étudié par l'intermédiaire d'un modèle sectoriel de la liaison. L'influence des paramètres de conception sur la tenue mécanique du boulon est également abordée. La présence d'éléments technologiques au droit du boulon tels que les entretoises, les joints ou les plaques d'appui est ensuite intégrée dans le modèle simplifié.

## 2. Comportement des assemblages soumis à un chargement excentré

Lorsque la vis est sollicitée parallèlement à son axe, le chargement peut se trouver éloigné par rapport à celui-ci conduisant à la présence de flexion dans le corps de la vis. Ce type d'assemblage est retrouvé pour des brides cylindriques (moteur d'aéronefs, couronne d'orientation, bride d'étanchéité [10], etc.). Les modèles sont adaptés en conséquence et la présence de flexion dans la vis doit être considérée dans le dimensionnement. Une majorité des configurations industrielles est confrontée à la criticité de la prise en compte de l'influence de la flexion. Des choix judicieux de conception tendent à réduire ce phénomène qui est préjudiciable pour la tenue mécanique de l'assemblage. La notion de décollement à l'interface des pièces assemblées est redéfinie pour ce type de chargement. Elle apparaît pour de faibles efforts et doit donc être considérée dans les critères de dimensionnement. Pour un certain nombre d'applications industrielles, des modèles simplifiés semi-analytiques sont privilégiés en phase de pré-dimensionnement. Il s'agit de modèles sectoriel monofixation représentant le boulon le plus sollicité et dont la structure assemblée est discrétisée en éléments finis élémentaires. Les travaux de El Masnaoui et al. [4], portant sur l'assemblage de brides cylindriques en composite tissé 3D, ont permis de développer un modèle semi-analytique utilisable dans des phases amont de conception. Il a été validé par une comparaison avec des résultats expérimentaux. Haddar et al. [7] se sont, quant à eux, intéressés au comportement des roues d'aéronefs notamment en cas de défaillance d'un boulon et ses conséquences. Des modèles analytiques sont également présents dans la littérature. Les études analytiques de Ślęczka et al. et Meizami et al. tiennent compte de la présence du boulon et son impact sur la déformée des brides en cas de chargement extérieur [11, 12]. Le modèle « poutre fléchie », dans une approche analytique, est basé sur la résistance des matériaux. Proposé par Agatonović [1, 2], puis repris par Guillot [6], il représente les pièces assemblées comme une poutre soumise à chargement à son extrémité. La version du modèle développée par Hammoum et al. considère des assemblages qui ne sont pas symétriques [8]. Cette non-symétrie peut être due à des géométries ou des matériaux différents. Les auteurs intègrent également la présence d'une entretoise dans l'assemblage. La Figure 1 synthétise les deux types de modélisation simplifiée pour les assemblages avec chargement excentré : une modélisation semi-analytique et analytique.

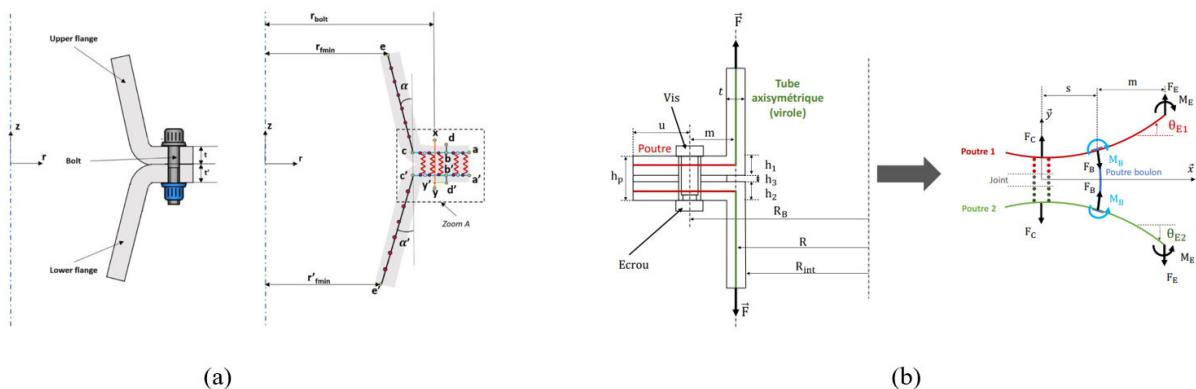


Figure 1 – Modélisation simplifiée (a) semi-analytique [5] et (b) analytique [8] développée spécifiquement pour les assemblages à chargement excentré

## 2.1. Cas d'étude

Dans cet article, une structure assemblée de grande dimension de type bride cylindrique comportant 72 boulons est étudiée (Figure 2). Elle se compose, dans sa configuration initiale, de deux brides en alliages d'aluminium (la bride supérieure et la bride inférieure) serrée par des boulons. Les vis sont partiellement filetées à tête hexagonale M8 de classe de qualité 10.9 et associées à des écrous hexagonaux. La géométrie de l'assemblage est ramenée à un secteur angulaire de  $5^\circ$  correspondant à un boulon afin d'exploiter les conditions de symétrie de chargement, géométrie et de conditions limites.

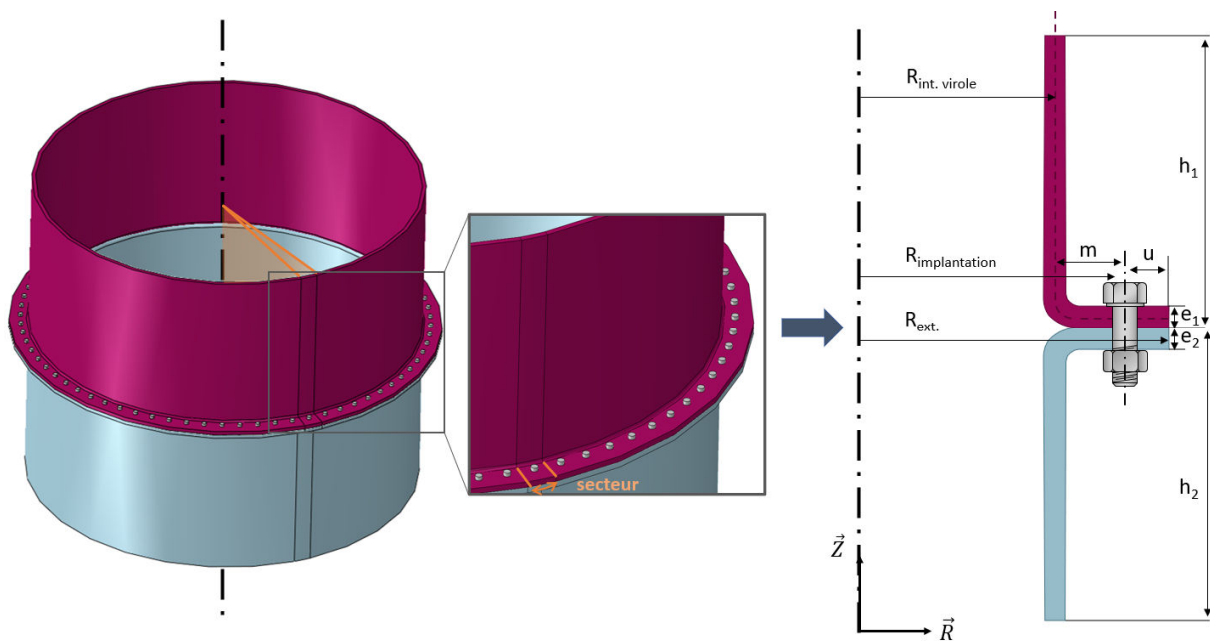


Figure 2 – Modélisation sectorielle d'un assemblage de brides cylindriques et paramètres géométriques prépondérants sur le comportement de la liaison

Une première phase de l'étude proposée concerne le développement d'un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis dans le logiciel de calcul commercial Abaqus®. Il est représentatif d'une bride cylindrique de grande dimension et doit permettre d'analyser le comportement des assemblages boulonnés soumis à un chargement fortement excentré par rapport à l'axe de la vis. La discrétisation de la structure assemblée est effectuée par des éléments volumiques (environ 316 000 degrés de liberté). Des éléments linéaires à intégration réduite ont été retenus dans une première approche. Un maillage structuré et raffiné dans les zones d'appui a été privilégié. Un comportement élastique des différents composants est considéré. Des conditions limites dans la direction orthoradiale sont appliquées pour tenir compte de l'influence du reste de la structure sur le comportement du secteur. La gestion du contact est effectuée via un contact normal et tangentiel (avec frottement). Le serrage du boulon est réalisé par l'outil *Bolt Load* disponible dans Abaqus®. Le filetage de la vis et de l'écrou n'est pas représenté de manière explicite. Il est ramené à un cylindre de diamètre résistant  $d_s$  correspondant au comportement du filetage. Plusieurs étapes ont été définies dans le calcul, afin de représenter la mise en précontrainte. La première étape du calcul consiste alors à introduire la précharge, via une tension dans la vis, puis un chargement mécanique extérieur est appliqué à l'extrémité des brides. Une sollicitation en déplacement imposé est privilégiée afin de faciliter l'analyse du comportement de l'assemblage.

## 2.2. Influence des choix de conception sur le comportement de l'assemblage

Le dimensionnement des assemblages soumis à un chargement excentré repose sur la tenue mécanique de la vis. Cela se traduit par la détermination des contraintes normales de traction et de flexion dans le fût de la vis et sur l'évaluation du décollement entre les brides assemblées.

### 2.2.1. Effet de la précharge sur le critère de décollement

L'installation d'une précharge dans l'assemblage permet de limiter le décollement entre les brides ainsi que les suppléments de contraintes dans la vis provoqués par le chargement extérieur. Ces éléments sont caractéristiques du comportement mécanique de ce type de liaison. Trois niveaux de serrage sont étudiés : un serrage à 30% de la limite élastique ( $R_e$ ) de la vis, à 50% et à 70%. Ces valeurs ne tiennent pas compte d'une éventuelle torsion dans le fût de la vis qui pourrait être induite par un serrage au couple. Le supplément de contraintes dû au chargement mécanique sur le fût de la vis diminue tant pour les contraintes normales de traction que de flexion avec l'augmentation du serrage.

La Figure 3 illustre ce phénomène à travers les contraintes normales totales (somme des contraintes normales de traction et de flexion) présentes dans le fût de la vis au niveau du plan de joint entre les deux brides. La section de la vis ici considérée est alors la section du diamètre nominal  $d$  et non la section résistante, zone la plus critique pour la tenue mécanique de la vis. Lorsqu'un chargement extérieur est appliqué à l'extrémité des viroles, un décollement s'opère entre les deux brides conduisant à une mise en flexion de la vis. Le comportement de l'assemblage est alors non-linéaire avec une première phase pour laquelle les contraintes évoluent peu dans la vis. Le décollement n'est alors pas encore suffisant pour induire une sollicitation importante dans la vis et est contraint par l'efficacité de la précharge. Plus la précharge est faible, plus la vis est sollicitée rapidement et le supplément de contraintes important. La tenue mécanique de la fixation est alors dépendante du niveau de précharge. Il est, par conséquent, souhaitable de disposer d'un serrage efficace, mais qui reste suffisamment éloigné de la limite élastique de la vis pour ne pas entrer dans le domaine plastique lors de l'application du chargement extérieur.

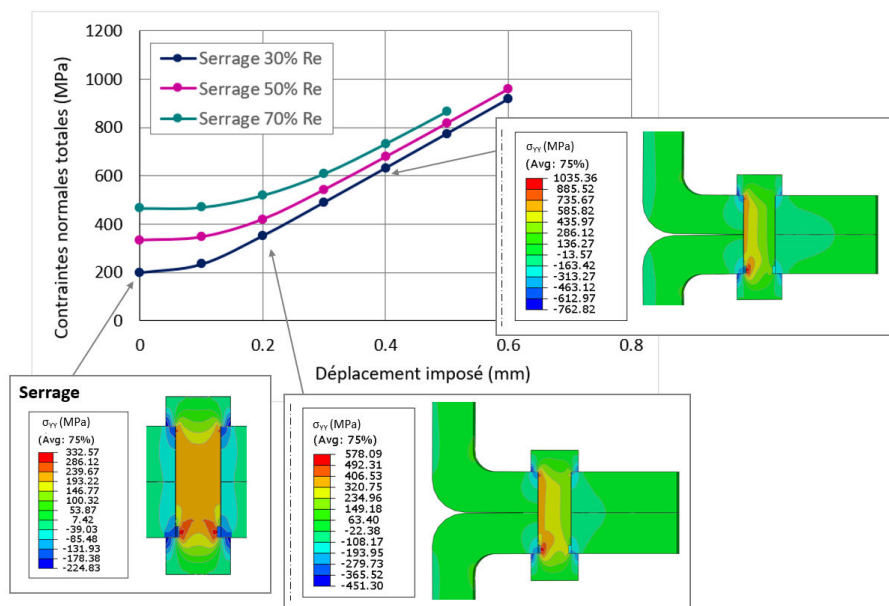


Figure 3 – Comportement d'un assemblage de brides cylindriques de grandes dimensions sous chargement mécanique appliqué aux extrémités de la virole des brides (déplacement imposé)

Dans cette étude d'influence du serrage, le rayon d'implantation du boulon est considéré comme fixe. Les paramètres  $m$  et  $u$  présentés à la Figure 2, sont un levier géométrique complémentaire au serrage, pour réduire le supplément d'effort perçu par la vis lors du chargement. Une étude paramétrée basée sur le rapport  $m/u$  sera présentée, afin de définir des règles de bonnes pratiques applicables pour la conception et le dimensionnement des assemblages soumis à un chargement excentré.

### 2.2.2. Ajout d'éléments mécaniques

Les liaisons boulonnées comprennent, au droit de la fixation, des composants mécaniques, afin d'améliorer et d'optimiser leur tenue mécanique. Parmi ces éléments, les entretoises, les rondelles ou les joints sont ajoutés dans l'empilement assemblé, afin de redistribuer les efforts dans l'assemblage. L'ajout d'une entretoise permet notamment d'assouplir la liaison à travers l'augmentation de la longueur serrée et l'utilisation de vis plus longues. Le comportement de l'assemblage (contraintes dans la vis et décollement) s'en trouve modifié permettant ainsi d'améliorer les performances mécaniques. La Figure 4 présente un assemblage avec l'ajout d'une entretoise entre la tête de vis et la bride supérieure. En présence de l'entretoise, les contraintes dans la vis sont fortement diminuées (contraintes normales de traction et de flexion). A l'opposé, le décollement entre les deux brides devient plus important conduisant, à la fin d'une sollicitation en déplacement imposé, à une zone de contact très limitée à l'extérieur du pied de bride. Le décollement est favorisé dans la configuration de l'assemblage avec entretoise par l'assouplissement de la liaison. Une étude comparative détaillée du comportement de l'assemblage (état de contraintes dans le boulon, zone de contact, contribution de l'entretoise et déformée des brides) sera présentée. Elle est complétée par des configurations d'assemblage avec rondelle (dont le comportement est assimilable à celui d'une entretoise de faible épaisseur) ainsi que pour une entretoise de hauteur importante.

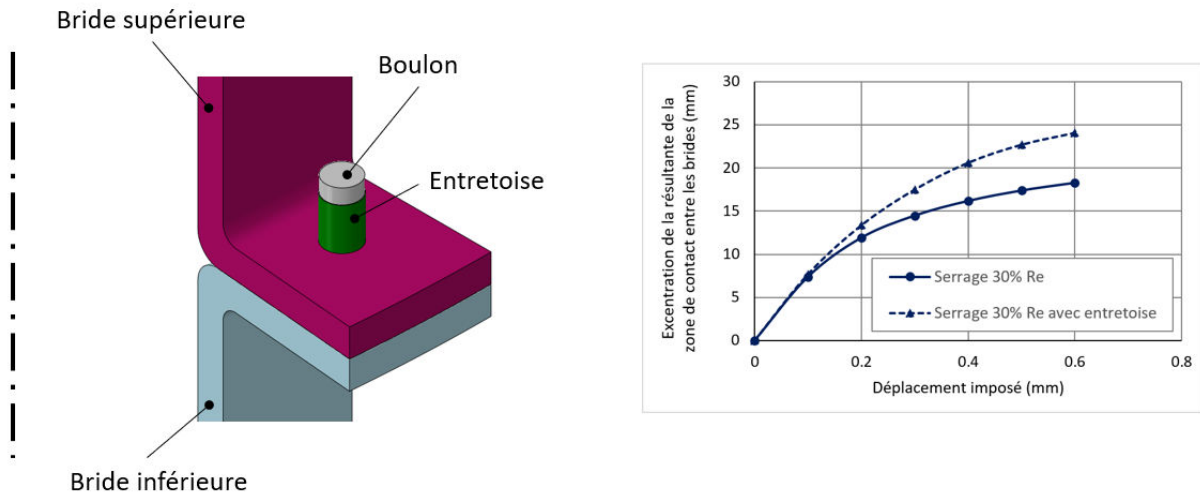


Figure 4 – Assemblage avec entretoise et influence sur le décollement entre les brides en présence de l'entretoise (pour un serrage à 30% du Re)

## 3. Modélisation simplifiée des liaisons boulonnées avec éléments technologiques

Les modèles présentés précédemment proposent une représentation volumique du boulon, bien que fortement simplifiée dans sa géométrie. Dans des phases de pré-dimensionnement de définition des structures assemblées, une modélisation du boulon par élément simplifié de type *poutre* (avec six degrés de liberté) est à envisager. L'objectif est de disposer d'un élément représentatif du comportement du boulon tout en diminuant fortement les temps de calcul. Dans le cas des assemblages

avec chargement excentré, les informations liées à la flexion dans la vis, et donc dans l'élément *poutre* doivent être connues.

L'élément *poutre* est relié aux brides assemblées par un couplage cinématique avec les zones d'appui de la tête de vis et de l'écrou (Figure 5). Plusieurs stratégies de paramètres géométriques liés à la poutre sont explorées. D'une section circulaire, le diamètre et la longueur de la poutre doivent permettre de représenter fidèlement le comportement du boulon en traction et en flexion. Une première approche consiste à considérer la poutre comme ayant une longueur égale à la longueur serrée et de diamètre nominal. Avec cette approche, les contributions de la tête de vis et de l'écrou ne sont pas considérées. Elle est comparée avec la définition d'une poutre équivalente dont la longueur équivalente est déterminée et combinée avec un diamètre équivalent qui traduit la souplesse axiale et en flexion du boulon [4]. Ces deux approches de définition de la poutre sont comparées, mais une comparaison avec un modèle numérique éléments finis dont le boulon est représenté par des éléments volumiques est également effectuée.

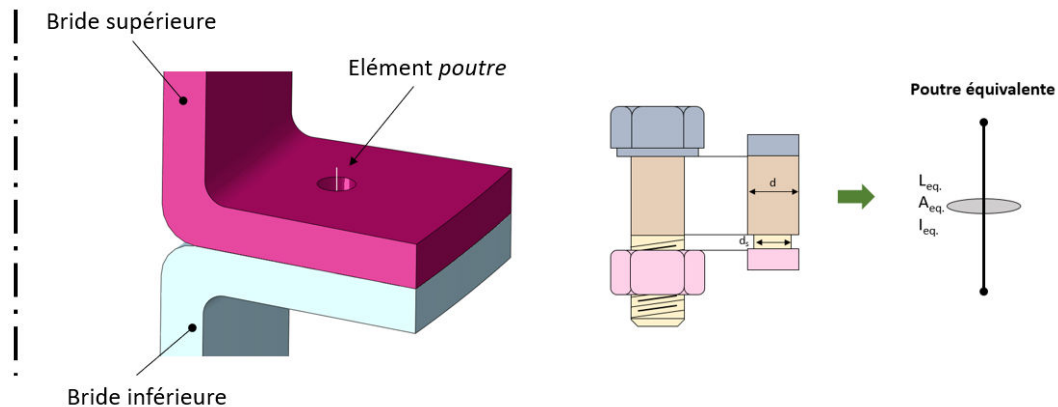


Figure 5 – Assemblage avec élément *poutre* pour représenter le comportement du boulon de manière simplifiée et stratégie de définition de l'élément *poutre*

Une fois le comportement du boulon et son influence sur la déformée de la bride traduits par l'élément *poutre*, la contribution des éléments technologiques couramment employés au droit des liaisons boulonnées est introduite. Dans un premier temps, un intérêt est porté vers l'ajout du comportement de l'entretoise. Sa forme géométrique ainsi que son comportement lors du chargement extérieur suggèrent que son comportement mécanique peut être combiné à celui du boulon. Hammoum et al. proposent cette approche dans le cas d'un modèle analytique avec des résultats prometteurs [8]. Cette stratégie est appliquée à l'élément *poutre*. Elle est validée par une comparaison avec un modèle de référence (boulon et entretoise discrétisés par des éléments volumiques) ainsi que par une confrontation avec des résultats expérimentaux. Enfin, en fonction de la hauteur de l'entretoise une stratégie complémentaire pourra être explorée. Elle pourra intégrer des entretoises de faible épaisseur correspondant à un comportement mécanique de type rondelle ou plaque d'appui. La prise en compte de ces éléments technologiques ne sera plus associée au boulon mais aux pièces assemblées.

## 4. Conclusion

Dans cette contribution, le comportement mécanique des assemblages boulonnés qui sont soumis à un chargement extérieur dans la direction de l'axe du boulon, mais à une distance éloignée est abordé. Il s'agit des assemblages dits à chargement fortement excentré. Ce chargement conduit à des stratégies de modélisation spécifiques en vue notamment de diminuer les temps de calcul pour la phase de pré-dimensionnement. La flexion présente dans la vis ainsi que la notion de décollement ont été, dans un premier temps, investiguées. L'effet de la précharge et de la géométrie de l'assemblage sur le

comportement de l'assemblage est déterminé. Le modèle simplifié, sous la forme d'un élément *poutre* enrichi, est par la suite décrit et validé par une comparaison avec un modèle éléments finis entièrement volumique. L'originalité de cette contribution réside dans l'intégration du comportement des éléments technologiques au droit du boulon dans le modèle simplifié. Certains composants mécaniques tels que les entretoises peuvent être associés au comportement du boulon et être intégrés dans l'élément *poutre*. En revanche, pour les joints, les rondelles ou les plaques d'appui, d'autres stratégies sont proposées avec une contribution de ces éléments orientée vers les pièces assemblées. Par ailleurs, les approches simplifiées proposées ont été validées par une comparaison avec un modèle de référence mais également par une confrontation avec des résultats expérimentaux.

## Références

- [1] P. Agatonović. Beam model of bolted flanged connections, *Eng.Comput*, 1985.
- [2] P. Agatonović. Structural integrity analysis of multi-bolted connections using the innovative beam model, *Structural Integrity and Life*, 147-156, 2011.
- [3] V.G. Belardi, P. Fanelli, F. Vivio. Analysis of multi-bolt composite joints with a user-defined finite element for the evaluation of load distribution and secondary bending, *Compos. Part B Eng.*, vol. 227, 109378, 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109378.
- [4] W. El Masnaoui. Développement d'un modèle de calcul simplifié d'un assemblage boulonné de carters composite tissé 3D et métallique soumis à un chargement fortement excentré, *Génie mécanique [physics.class-ph]*. INSA de Toulouse, 2020. Français. NNT : 2020ISAT0033. tel-04356623.
- [5] W. El Masnaoui, A. Daidié, F. Lachaud, C. Paleczny. Semi-analytical model development for preliminary study of 3D woven Composite/Metallic flange bolted assemblies. *Composite Structures*, 112906, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112906.
- [6] J. Guillot. Calcul des assemblages vissés - Assemblages soumis à une charge excentrée. Partie 2, *Techniques de l'ingénieur*, 2008, doi: 10.51257/a-v2-bm5563.
- [7] A. Haddar, A. Daidie, E. Rodriguez, L. Augustins. Mechanical strength of highly preloaded bolts affected by the ovalization of an aircraft wheel, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 236, n° 8, 4286-4298, 2022, doi: 10.1177/09544062211050511.
- [8] R. Hammoum, A. Fau, A. Daidié, et F. Lachaud. Modèle analytique généralisé aux assemblages de brides cylindriques boulonnées, 25<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Août 2022, Nantes, France. hal 04280159, 2022.
- [9] Q. Lançon, P.A. Guidault, P.A. Boucard, N. Vallino. A two-node nonlinear connector for simulating simplified models of bolted joints under extreme loads, *Computational Mechanics*, 2025, doi: 10.1007/s00466-025-02688-0.
- [10] I. Okorn, M. Nagode, J. Klemenc, S. Oman. Analysis of additional load and fatigue life of preloaded bolts in a flange joint considering a bolt bending load, *Metals MDPI*, 2021, doi: 10.3390/met11030449.
- [11] L. Ślęczka, D. Leń. Prying action in bolted circular flange joints: Approach based on component method, *Engineering Structures*, 111-528, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111528.
- [12] F. Meisami, M. Moavenian, A. Afsharfard. Nonlinear behavior of single bolted flange joints: A novel analytical model, *Engineering Structures*, 908-917, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.07.035.
- [13] R. Verwaerde. Stratégie d'élaboration, d'identification et optimisation d'un modèle de connecteur pour la simulation d'assemblages boulonnés, *Génie mécanique [physics.class ph]*. Université Paris Saclay, 2020. Français. NNT : 2020UPAST018. tel 03130671.