CSMA 2015
12e Colloque National en Calcul des Structures
18-22 Mai 2015, Presqu'île de Giens (Var)

# Modélisation et identification d'un connecteur élément fini non-linéaire pour la simulation d'assemblages boulonnés

P.-A. Guidault[1], M.-F. Soulé de Lafont[1], P.-A. Boucard[1]

[1] *LMT-Cachan (ENS Cachan/CNRS/Université Paris-Saclay), {guidault,soule,boucard}@lmt.ens-cachan.fr*

**Résumé** — Un modèle de connecteur élément fini à deux noeuds est proposé pour la simulation de liaisons boulonnées. Ce connecteur prend en compte les phénomènes de frottement, de précharge et de jeu dans la liaison. L'identification du modèle de connecteur est réalisée à partir de calculs 3D sur une liaison élémentaire et obtenue par une méthode de décomposition de domaine basée sur une formulation par lagrangien augmenté afin de traiter efficacement les conditions de contact frottant. Le connecteur est intégré sous forme d'un élément utilisateur dans SAMCEF.
**Mots clés** — liaisons boulonnées, connecteur élément fini non-linéaire, contact frottant, identification.

## 1 Contexte

Les liaisons boulonnées sont des éléments omniprésents en mécanique et notamment dans les structures aéronautiques (3 000 000 d'attaches sur un A380, 50 000 sur un Rafale). Malgré des règles de conception et des procédures d'assemblage bien établies, des sources d'incertitudes importantes subsistent dues à la forte sensibilité du comportement mécanique des liaisons aux dispersions (procédure de serrage, frottement, tolérances géométriques...). L'optimisation en masse et en coût des assemblages boulonnés pour des chargements complexes nécessite des stratégies de conception plus élaborées permettant une prise en compte plus fine des phénomènes mis en jeu au sein des liaisons (contact, jeux, frottement...).

Les calculs 3D à l'échelle fine d'assemblages boulonnés sont généralement trop coûteux pour les étapes de pré-dimensionnement et d'optimisation. Aussi, l'ingénieur a bien souvent recours à des connecteurs ou *user elements* proposés dans les codes commerciaux pour modéliser le comportement de liaison boulonnées pour l'assemblage de modèles 3D ou modèles plaques (Figure 1). Le comportement du

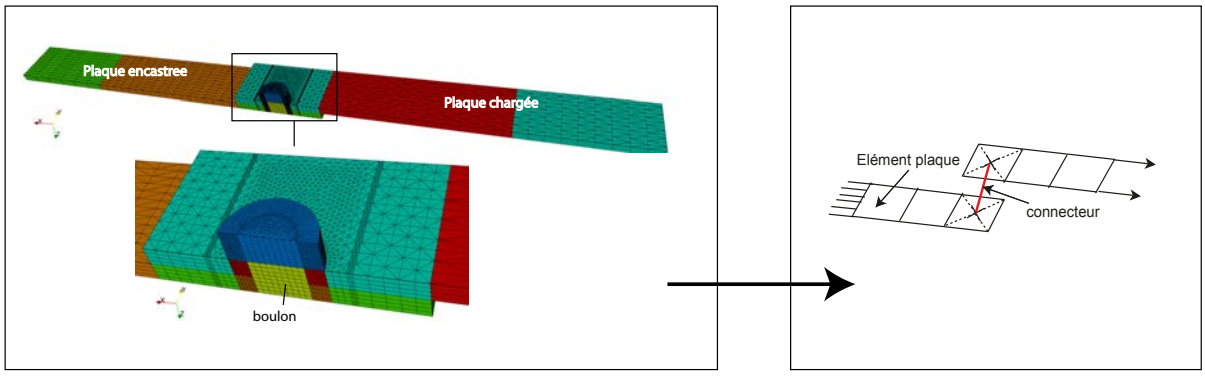



FIGURE 1 – Modèle 3D et modèle plaques/connecteur

connecteur est identifié à partir de calculs 3D fin à l'échelle de la liaison et/ou à partir de résultats d'essai. L'identification est généralement menée pour une gamme de chargements types et pour un jeu de paramètres de conception donné. Elle se limite le plus souvent à la partie élastique du comportement. Dans des cas bien spécifiques, des modèles simplifiés ou analytiques [1] existent mais principalement pour les problèmes d'élasticité linéaire en statique ou dynamique.

L'enjeu scientifique de ce travail réside dans la proposition d'un connecteur élément fini suffisamment simple pour une utilisation à l'échelle de grands assemblages mais également robuste vis-à-vis de

la simulation des phénomènes non-linéaires mis en jeu comme le contact frottant entre pièces de l'assemblage. Afin de faciliter l'optimisation des liaisons boulonnées, un modèle de connecteur basé sur des paramètres de conception (coefficient de frottement, précharge du boulon, jeu) est proposé et développé sous forme d'un élément utilisateur dans SAMCEF.

## 2 Description du modèle de connecteur

Le modèle proposé doit permettre de rendre compte des mécanismes de déformation typiques illustrés en Figure 2. Un connecteur à deux noeuds est proposé pour modéliser le comportement d'un boulon.

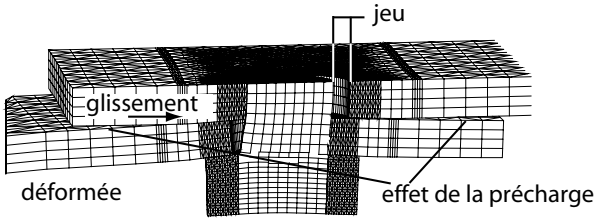



FIGURE 2 – Déformée d'un assemblage boulonné en configuration double cisaillement pour un chargement de traction

Le couplage cinématique (*MEAN* dans SAMCEF) du connecteur à son environnement - modèles plaque ou 3D - participe à la modélisation du comportement de la liaison (Figure 3). Aussi, l'identification des paramètres du modèle du connecteur dépend des rayons des zones de couplage $S_a$ et $S_b$. La taille de la

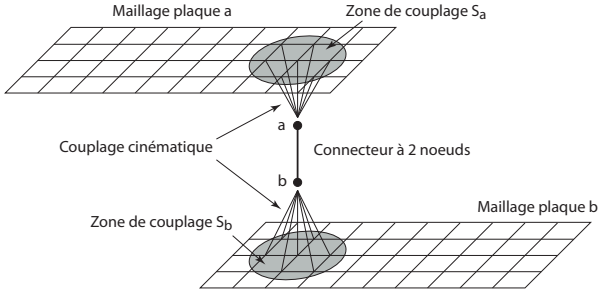



FIGURE 3 – Connecteur et couplages cinématiques avec les maillages de plaque à connecter

zone de couplage cinématique est liée à l'action de la tête de vis ou de l'écrou sur les plaques qui sous l'action de la précharge rigidifie cette zone [2].
Le comportement axial du connecteur modélise l'effet de l'effort de précharge $P_c$ ainsi que la rigidité équivalente des pièces assemblées (plaques et vis). La raideur normale $c_N$ peut être déterminée par exemple par une simple loi des mélanges [3].
Le comportement tangentiel (dans le plan de glissement entre plaques assemblées) prend en compte le frottement entre plaques induit par la précharge dans le voisinage du boulon ainsi que le contact potentiel entre corps de vis et trou de perçage. Des éléments de contact sans frottement permettent de modéliser simplement les interactions entre plaques et l'effet de la longueur de bridage. Le comportement tangentiel désiré (Figure 4) permet de décrire les états de 1) comportement élastique, 2) glissement macroscopique entre plaques et 3) contact corps de vis / trou [4].

Une analogie avec un comportement elasto-plastique avec écrouissage est utilisée [5]. Le saut de déplacement tangentiel, $\mathbf{g}_T$, aux noeuds du connecteur est séparé en une partie élastique (adhérente), $\mathbf{g}_T^e$, et une partie plastique (glissante), $\mathbf{g}_T^s$ : $\mathbf{g}_T = \mathbf{g}_T^e + \mathbf{g}_T^s$. Pour un écrouissage isotrope, la fonction seuil est :

$$f_s(\mathbf{t}_T, p_N, g_v) = \|\mathbf{t}_T\| - (\mu + g_v H) p_N$$

où $\mu$ est le coefficient de frottement entre plaques, $H$ le module d'écrouissage et $g_v$ le glissement effectif cumulé. L'effort tangentiel est noté $\mathbf{t}_T$. L'effort de contact $p_N$ est défini par :

$$p_N = \left\langle P_C - c_N \left\langle \mathbf{n}^T \mathbf{g} \right\rangle_+ \right\rangle_+$$

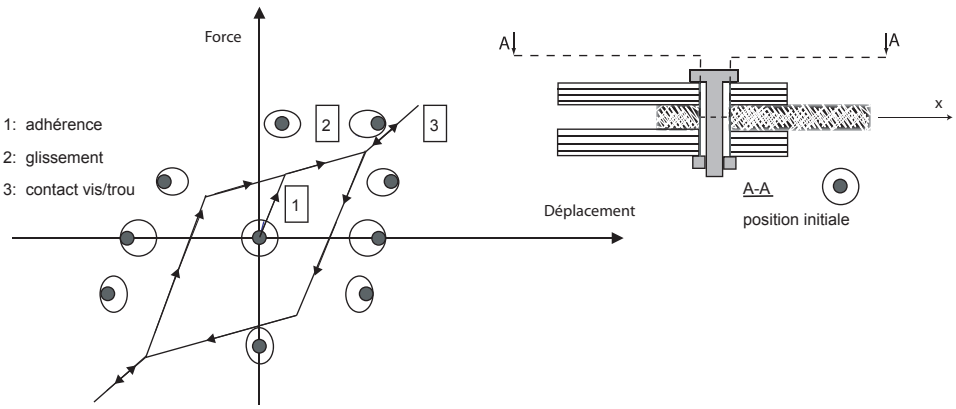



FIGURE 4 – Comportement tangentiel du connecteur : comportement élastique (état 1), glissement macroscopique entre plaques (état 2), contact corps de vis / trou (état 3)

où $\mathbf{n}^T\mathbf{g}$ est le saut de déplacement normal, dans la direction $\mathbf{n}$ du connecteur. Cet effort s'annule si une traction axiale sur le boulon annule la précharge. L'effort axial dans le connecteur est défini par $t_N = P_C + c_N(\mathbf{n}^T\mathbf{g})$. La loi d'évolution est définie par :

$$\left\{\begin{array}{rcl} \dot{\mathbf{g}}_T^s & = & \dot{\gamma}\dfrac{\partial f_s(\mathbf{t}_T)}{\partial \mathbf{t}_T} = \dot{\gamma}\mathbf{n}_T \quad \text{with} \quad \mathbf{n}_T = \dfrac{\mathbf{t}_T}{\|\mathbf{t}_T\|} \\ \dot{g}_v & = & \dot{\gamma} = \lambda \quad \text{with} \quad g_v(t) = \int_0^t \|\dot{\mathbf{g}}_T(\tau)\|\mathrm{d}\tau \end{array}\right. \tag{1}$$

On introduit enfin les conditions de Kuhn-Tucker : $\dot{\gamma} \geq 0, \quad f_s(\mathbf{t}_T) \leq 0, \quad \dot{\gamma} f_s(\mathbf{t}_T) = 0$.

L'intégration du comportement tangentiel (force tangentiel $\mathbf{t}_T$ et dissipation) est réalisée par un algorithme de retour radial basé sur une intégration objective de la loi d'évolution (Euler implicite). En testant au pas courant $n+1$ si $\|\mathbf{g}_T\| > \dfrac{j}{2}$ où $j$ est le jeu diamétral entre le trou et le corps de vis, on peut détecter un contact (état 3 sur la Figure 4) et corriger le multiplicateur plastique $\lambda : \lambda \to \lambda - \left(\|\mathbf{g}_{T,(n+1)}\| - \dfrac{j}{2}\right)$ La mise à jour de $\mathbf{g}_T^s$, $g_v$ et $\mathbf{t}_T$ en découle.

En notant $c_T$ la constante de rigidité élastique, on a $\mathbf{t_T} = c_T\,\mathbf{g}_T^e$. On en déduit les raideurs tangentes pour les états d'adhérence (élasticité) et de glissement (états 1 et 2 en Figure 4). La constante de rigidité pour l'état 3 de contact corps de vis / trou est notée $c_C$. Le modèle de connecteur est développé sous forme d'un élément utilisateur dans SAMCEF.

# 3 Identification des paramètres du connecteur

L'identification des paramètres $c_T$, $c_C$ et $H$ liés au comportement tangentiel est réalisé sur un assemblage élémentaire de plaques en configuration double cisaillement, représentatives de la structure finale à tester. Par symétrie seul un quart du système est étudié (Figure 5). Un chargement de traction/compression alterné est appliqué à l'une des extrémités du système. Les valeurs imposées de précharge du boulon, de coefficient de frottement entre plaques et de jeu diamétral trou/vis sont : $P_c = 42$ kN, $\mu = 0.24$ et $j = 0.15$ mm.

Le calcul 3D de référence est réalisé à l'aide d'une méthode de décomposition de domaine mixte similaire à une méthode de lagrangien augmenté et un algorithme de résolution de type Uzawa afin de traiter efficacement les conditions de contact avec frottement [6]. L'identification du modèle de connecteur est réalisée sur la phase de charge. La comparaison avec le calcul 3D montre une bonne corrélation du glissement effectif cumulé ainsi que de l'énergie dissipée sur le cycle complet (Figure 6).

La validation sur des structures et des chargements plus complexes impliquant de multiple liaisons boulonnées est actuellement en cours d'étude.

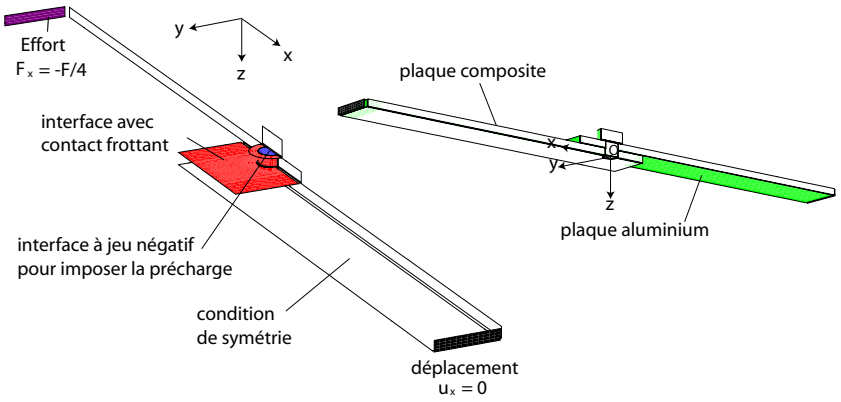



FIGURE 5 – Symétries, conditions limites et conditions de contact pour le quart de l'assemblage

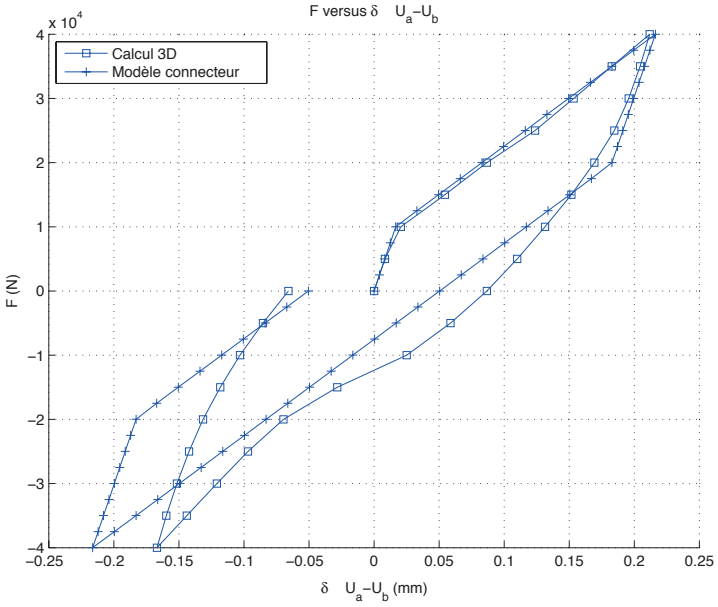



FIGURE 6 – Effort axial en fonction du déplacement relatif tangentiel aux noeuds $a$ et $b$ du connecteur $\delta = (\vec{u}_a - \vec{u}_b) \cdot \mathbf{x} = \mathbf{g}_T \cdot \mathbf{x}$

## Remerciements

Le FUI, fonds unique interministériel, est remercié pour son financement du projet CARAB (http ://www.systematic-paris-region.org/fr/projets/carab).

### Références

[1] H. Huth. *Influence of fastener flexibility on the prediction of load transfer and fatigue life for multiple-row joints*, Fatigue in mechanically fastened composite and metallic joints, ASTM STP, 927 :221-250, 1986.

[2] F. Rotscher. *Die Maschinenelemente*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1927.

[3] F. Alkatan, P. Stephan, A. Daidié, J. Guillot. *Equivalent axial stiffness of various components in bolted joints subjected to axial loading*, Finite Elements in Analysis and Design, 8 :589-598, 2007.

[4] M. Cloirec, P.-A. Boucard, L. Champaney, S. Guinard, J. Sen Gupta. *Study for design and identification of a bolted joint model*, Complas IX, 2 :889-892, 2007.

[5] P. Wriggers. *Computational Contact Mechanics*, John Wiley & Sons Ltd., 2002.

[6] C. Blanzé, L. Champaney, J.-Y. Cognard, P. Ladevèze. *A modular approach to structure assembly computations. Application to contact problems*, Engineering Computations, 13(1) :15-32,1995.