

Etude numérique du comportement cyclique de la zone tendue d'assemblage à deux et à quatre files de boulon

SEBBAGH Hichem Rakib^{1,2}

¹ LM2SC, Département de Génie Civil, U.S.T.O.M.B, B.P. 1505 El M'Naouer, Oran, Algérie.

² Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France.

RESUME Le présent papier est consacré à l'étude numérique par éléments finis du comportement de la zone tendue d'assemblages métalliques de type poteau-poutre avec platine d'about sous sollicitations cycliques. Cette zone peut être représentée par des tronçons en té avec deux et quatre rangées de boulons. Dans un premiers temps un modèle numérique tridimensionnel représentant un tronçon en té à deux boulons par rangée a été élaboré. Il a été calibré sur la base de résultats expérimentaux de tronçons en té sous sollicitation monotone en termes de courbes Force-Déplacement. Par la suite, ce modèle a été utilisé comme base pour élaborer un modèle de tronçon à quatre boulons par rangée. Les deux modèles élaborés ont été construits avec des éléments cubiques à 20 nœuds du logiciel Cast3m. Ces modèles ont permis d'estimer l'apport des boulons externes sur le comportement des tronçons en té sous sollicitations cycliques.

Mots-clefs Assemblage poteau-poutre, Tronçon en té, Quatre rangées de boulons, Eléments finis, Sollicitation cyclique.

I. INTRODUCTION

La conception structurelle d'ossatures en zone sismique nécessite une réflexion spécifique afin de garantir la stabilité des structures. Les ossatures métalliques offrent une bonne aptitude à résister aux séismes au regard de leurs capacités de déformations plastiques. Toutefois, durant les tremblements de terre de Northridge (1994) et de Kobe (1995), de nombreuses défaillances au niveau des zones d'assemblages ont été observées (Piluso et Rizzano 2008) (Iannone, et al. 2011). De par ces défaillances, plusieurs chercheurs (Gebben, Wanzek et Petersen 1997) (Bursi et Jaspert 1997) se sont intéressés à l'étude du comportement des assemblages boulonnés qui offraient une meilleure ductilité tels que les assemblages par platine d'about avec deux boulons par rangée (Sumner et Murray 2002).

Ce type d'assemblage a connu une large utilisation dans les structures métalliques. Toutefois, la prédiction de son comportement reste complexe en raison de fortes complexités géométriques et mécaniques. A cet effet, plusieurs travaux de recherche (Al-Khatib et Bouchaïr 2007) (Bouchaïr, Averseng et Abidelah 2008) (Abidelah, Bouchaïr et Kerdal 2012) (Latour, et al. 2014) ont été consacrés à la caractérisation du comportement réel des assemblages par platine d'about sous sollicitations monotones. Ces travaux s'appuient sur la méthode des composantes du règlement (EN_1993-1-8 2005) qui permet l'idéalisation de la zone tendue de l'assemblage par des tronçons en té. Toutefois, l'étude du comportement de ce type d'assemblages sous sollicitations cycliques reste relativement limitée (Bernuzzi, Zandonini et Zanon 1996) (Nemati, Le Houede et Zandonini 2000) (Piluso et Rizzano 2008).

Durant les dernières années, des chercheurs (**Demonceau, et al. 2010**) (**Latour, et al. 2014**) (**Haouas, et al. 2019**) se sont intéressés à l'analyse des assemblages par platine d'about avec quatre boulons par rangée sous sollicitations monotones. Les auteurs ont conclu que l'ajout de boulon externe permet d'augmenter la résistance et la raideur initiale de l'assemblage.

Cet article a pour objectif d'étudier le comportement cyclique des tronçons en té à deux et à quatre boulons par rangée. Dans un premier temps, un modèle en éléments finis est élaboré pour une configuration de tronçon à 2 boulons (Fig.1), ce modèle est calibré sur la base des essais expérimentaux disponibles dans la littérature. Le modèle ainsi validé est par la suite utilisé en ajoutant une rangée de boulons externes afin de former un tronçon à 4 boulons par rangée (Fig.2). Les deux tronçons sont analysés sous sollicitations cycliques conformément aux recommandations de la ECCS (**ECCS 1986**) dans le but de quantifier l'apport de l'ajout des boulons externes sur le comportement cyclique des tronçons. La comparaison entre ces deux types de tronçons est effectuée sur la base des courbes (F- δ) hystérétiques ainsi que sur l'évolution des efforts dans les boulons et des efforts de levier. Une autre comparaison est menée en s'appuyant sur les paramètres clés du comportement cyclique issus des recommandations de la ECCS (**ECCS 1986**) pour les tronçons en té à deux et quatre boulons par rangée.

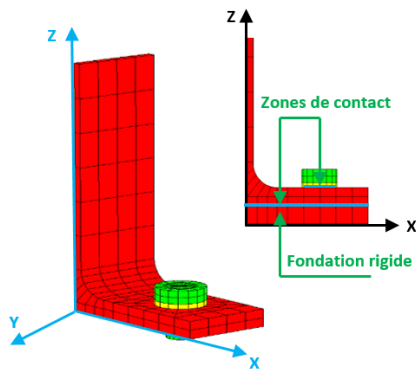


FIGURE 1. Quart du Tronçon en té avec 2 boulons par rangée (TB1)

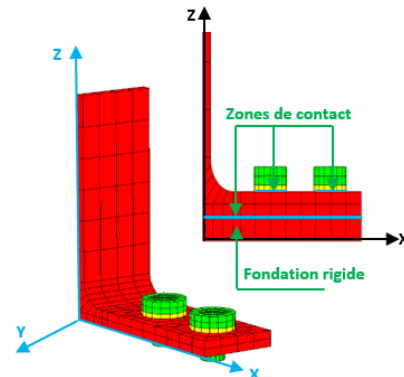


FIGURE 2. Quart du Tronçon en té avec 4 boulons par rangée (TB2)

II. MODELISATION NUMERIQUE

II.1 Modèle numérique 3D du tronçon en té à deux boulons par rangée

La Fig.1 donne un aperçu du maillage 3D du tronçon en té avec rangées à deux boulons. Des éléments volumiques iso-paramétriques de forme cubiques à 20 nœuds nommés CU20 dans Cast3m sont utilisés. Le boulon est constitué d'une tête, une rondelle et une tige. Cette dernière est de forme cylindrique avec un diamètre constant pris égal au diamètre de la partie non filetée. De plus une longueur équivalente proposée par Agerskov (**Agerskov 1977**) pour tenir compte de l'effet du filetage du boulon et la flexibilité de l'écrou a été utilisée durant la modélisation. En outre, un encastrement parfait au niveau de la base du boulon ainsi qu'un blocage de déplacement dans les deux plans de symétries est réalisé pour tenir compte de la symétrie (plan X-Y pour U_Z et plan Y-Z pour U_X). Un contact sans frottement est considéré entre la rondelle et la partie supérieure de la semelle du tronçon et sous la partie inférieure de la semelle.

II.2 Validation du modèle sous chargement monotone

La validation du modèle numérique est réalisée en comparant les résultats, en terme de courbe force déplacement, obtenus numériquement avec ceux obtenus lors de l'essai réalisé par **(Bursi et Jaspert 1998)** sur un tronçon en té (Tb1). Le tronçon en té est un assemblage symétrique, obtenu à partir d'un profilé IPE 300 attaché par l'intermédiaire de quatre boulons M12 de classe 8.8. Les caractéristiques géométriques du tronçon en té sont représentées sur la Fig.3 et les caractéristiques mécaniques des matériaux sont données dans le tableau 1.

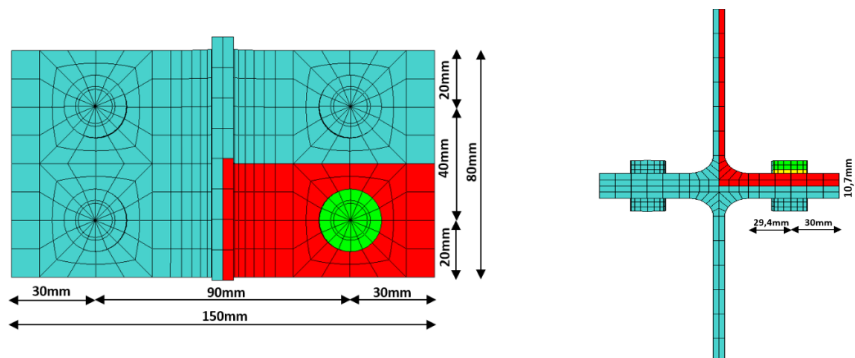


FIGURE 3. Caractéristiques géométriques du tronçon en té Tb1 (rangée à 2 boulons)

TABLEAU 1. Caractéristiques mécaniques des matériaux du tronçon en té Tb1

Tronçon en té	Tronçon f_y / f_u (MPa)	Boulons f_y / f_u (MPa)
Tb1	431/595	893 / 974

Les courbes globales force-déplacement obtenues numériquement et expérimentalement sont présentées sur la Fig.4. Les courbes montrent que le modèle numérique représente avec une précision acceptable le comportement réel du tronçon en té en termes de rigidité initiale et de résistance.

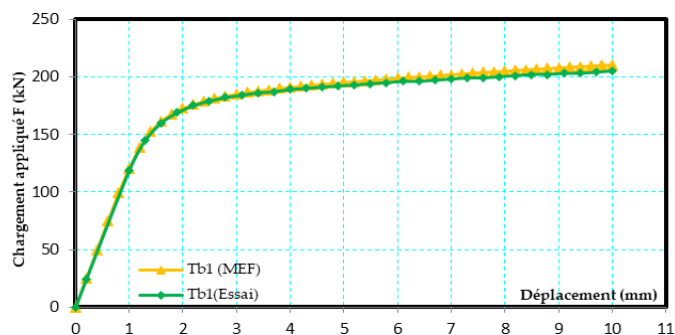


FIGURE 4. Courbes F- δ monotones du tronçon Tb1

II.3 Modèle numérique 3D du tronçon en té à quatre boulons par rangée

Après validation du modèle numérique représentant un tronçon en té à deux boulons par rangée (Tb1), la modélisation du tronçon à quatre boulons par rangée nommé Tb2 (Fig.2) est effectuée à partir du tronçon (Tb1) développé précédemment en se référant aux conditions géométriques

données par l’EC3 (EN_1993-1-8 2005). Les caractéristiques géométriques du tronçon en té Tb2 sont présentées sur la Fig.5. Les caractéristiques mécaniques, les hypothèses et les lois de comportement considérées pour le tronçon Tb2 sont les mêmes que celles utilisées pour le tronçon Tb1.

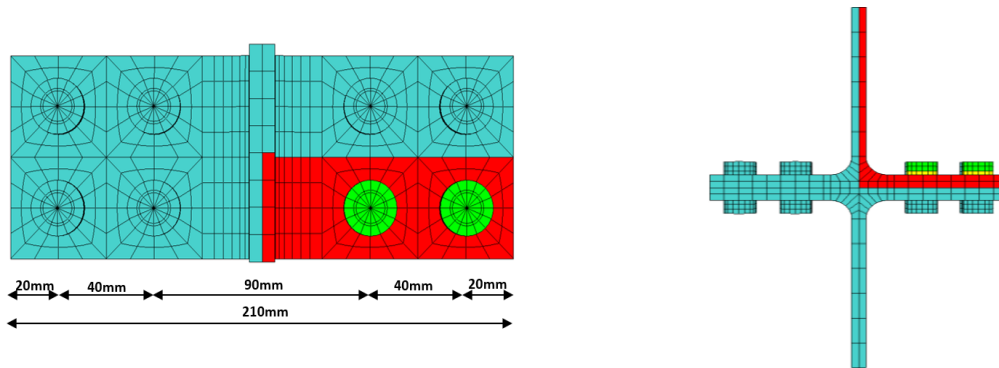


FIGURE 5. Caractéristiques géométriques du tronçon Tb2 (rangée à 4 boulons)

II.4 Chargement cyclique

Le chargement cyclique considéré dans l’analyse numérique du comportement du tronçon en té est basé sur les recommandations de la Convention Européenne de la Construction Métallique (ECCS 1986) (Fig.6). La ECCS (ECCS 1986) recommande d’effectuer au préalable un chargement monotone dans le but de déterminer le paramètre clé qui régit l’historique de chargement cyclique à savoir la valeur du déplacement élastique conventionnel δ_y qui correspond à un niveau de charge F_y (résistance élastique). La résistance élastique (F_y) correspond à l’intersection des deux droites tangentes aux extrémités de la courbe (F- δ) sous chargement (ECCS 1986). Le chargement monotone considéré est réalisé par déplacement imposé croissant appliqué sur la partie supérieure de l’âme du tronçon. D’après les courbes (F- δ) obtenues sous chargement monotone pour les tronçons Tb1 et Tb2 (Fig.7) et en se basant sur les recommandations de la ECCS (ECCS 1986), la valeur du déplacement élastique conventionnel δ_y obtenue est égale à 1,3mm pour les deux tronçons. Les deux résistances élastiques correspondent à 180 kN pour Tb1 et 190 kN Pour Tb2.

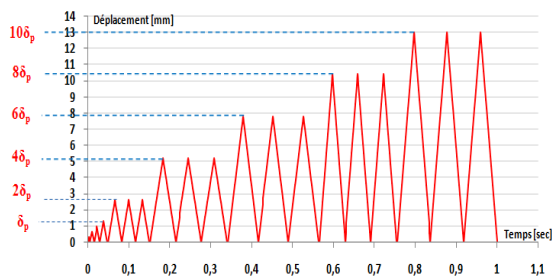


FIGURE 6. Historique de chargement

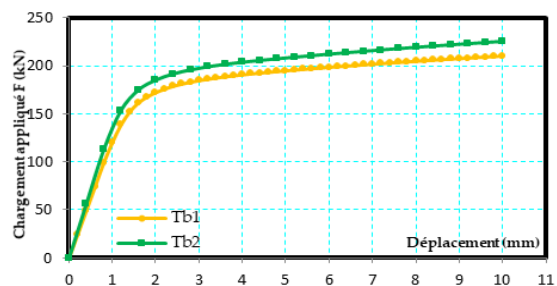
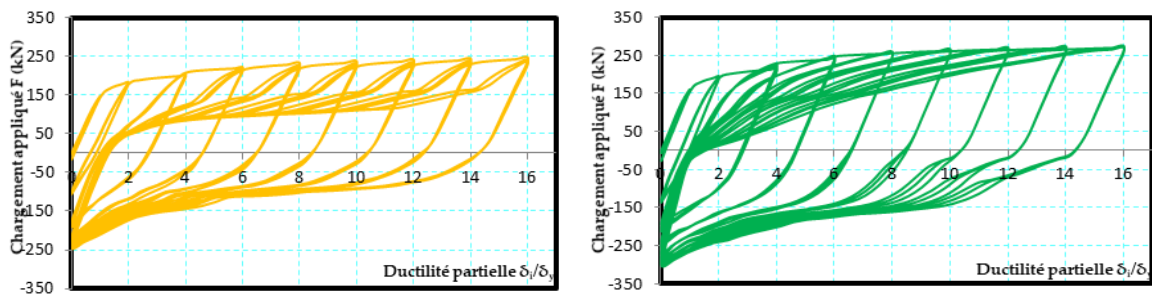


FIGURE 7. Courbes F- δ monotones (Tb1 et Tb2)

III. ANALYSE DES RESULTATS

III.1 Courbes Force-Déplacement cycliques (Tb1 et Tb2)

Les courbes force-déplacement des tronçons en té Tb1 et Tb2 obtenues numériquement sous sollicitations cycliques sont données sur la Fig.8. Pour une charge inférieure à la charge élastique (F_y), les courbes obtenues à partir des deux tronçons (Tb1 et Tb2) ont la même allure. Toutefois, après dépassement de cette charge, la courbe F- δ du tronçon à deux boulons par rangée est caractérisée par un plateau horizontal ce qui donne lieu à une rigidité quasiment nulle, contrairement à la courbe du tronçon à quatre boulons par rangée où les boucles d'hystérésis sont plus stables et où aucune variation notable de rigidité n'est observée.



a. Tb1

b. Tb2

FIGURE 8. Courbes F- δ cycliques

III.2 Déformées finales des tronçons (Tb1 et Tb2)

Les déformations finales des tronçons en té Tb1 et Tb2 modélisés sous sollicitations cycliques sont données sur la Fig.9. En phase de chargement, les deux tronçons se déforment de la même manière avec un décollement de la semelle près du congé de raccordement. Cependant, en phase de déchargement, un soulèvement de l'extrémité libre de la semelle du tronçon Tb1 se produit ce qui confirme les observations décrites par Nemati (Nemati, Le Houede et Zandonini 2000). Toutefois, aucun soulèvement n'est observé pour le tronçon Tb2. Ce qui montre que l'ajout d'un boulon externe empêche le soulèvement de l'extrémité libre de la semelle du tronçon en té et explique en partie l'allure des courbes de la Fig.8.



a. Tb1

b. Tb2

FIGURE 9. Déformées finales des tronçons en té

III.3 Efforts de levier des tronçons (Tb1 et Tb2)

Les évolutions des efforts de levier (F_q) en fonction du chargement cyclique pour les tronçons en té à deux et quatre boulons par rangée sont données sur la Fig.10. Le premier constat est que l'intensité des efforts de levier en phase de chargement est moins importante qu'en phase de déchargement pour les deux tronçons en té (Tb1 et Tb2). Toutefois, pour le tronçon à deux boulons par rangée (Tb1), en phase de chargement, une annulation temporaire des efforts de levier est observée, contrairement au tronçon à quatre boulons par rangée (Tb2) où les efforts de levier sont toujours présents.

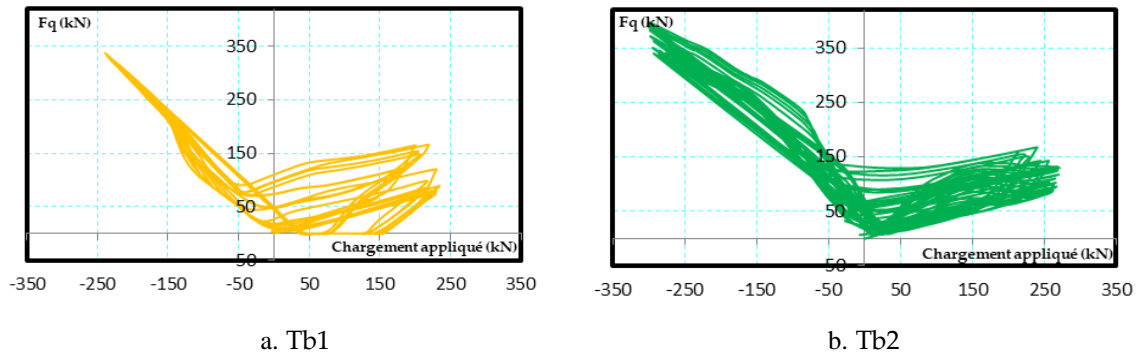


FIGURE 10. Efforts de levier fonction des charges appliquées

III.4 Efforts dans les boulons des tronçons (Tb1 et Tb2)

Les efforts dans les boulons des tronçons en té (Tb1 et Tb2) sont donnés sur la Fig.11. Le premier constat est que la participation des boulons à la résistance diffère entre les deux tronçons en té (Tb1 et T2). L'effort dans les boulons du tronçon (Tb1) et des boulons internes du tronçon Tb2 est plus important en phase de chargement qu'en phase de déchargement. De plus, en phase de déchargement, durant le dernier cycle de charge on observe une annulation permanente des efforts dans les boulons internes du tronçon Tb2, cette annulation n'est que temporaire pour le tronçon Tb1. En ce qui concerne les boulons externes du tronçon Tb2, la participation à la résistance est plus importante en phase de déchargement qu'en phase de chargement. La participation des boulons externes à la résistance est continue durant le dernier cycle de charge, ce qui permet de compenser la non-reprise d'effort des boulons internes du tronçon Tb2.

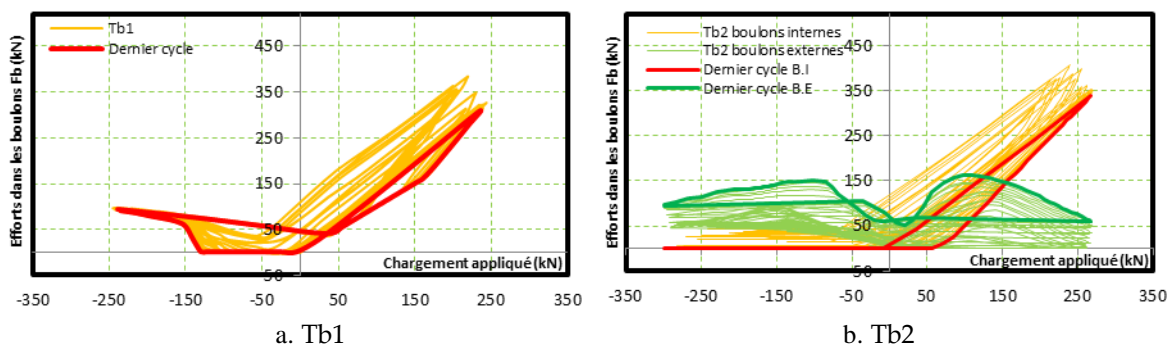


FIGURE 11. Efforts dans les boulons

III.5 Paramètres clés de la ECCS

Dans le but d'estimer l'amélioration de résistance due à l'ajout des boulons externes dans les tronçons en té soumis à des sollicitations cycliques, une comparaison sur la base des paramètres clés donnés par la ECCS est effectuée. Il est à noter que cette évaluation est applicable uniquement pour des valeurs de déplacement $\delta_i > \delta_y$ comme indiqué par la ECCS. Le rapport des résistances (F_i^+ / F_y^+) en fonction de la ductilité partielle δ_i / δ_y des tronçons en té (Tb1 et Tb2) est présenté sur la Fig.12. A partir de cette figure, on note que les deux tronçons sont soumis à une baisse du rapport des résistances F_i^+ / F_y^+ pour chaque répétition de cycle avec la même amplitude de charge. Toutefois, la baisse du rapport de résistance F_i^+ / F_y^+ du tronçon (Tb2) reste minime contrairement à celle observée pour le tronçon (Tb1).

La chute de résistance (F^+ / F^{+2}) en fonction de la ductilité partielle δ_i / δ_y est présentée sur la Fig.13. Il est à noter que le tronçon (Tb1) est caractérisé par une importante chute de résistance, contrairement au tronçon (Tb2) où le rapport entre le dernier et le premier cycle de chargement avec la même amplitude avoisine la valeur de 1.

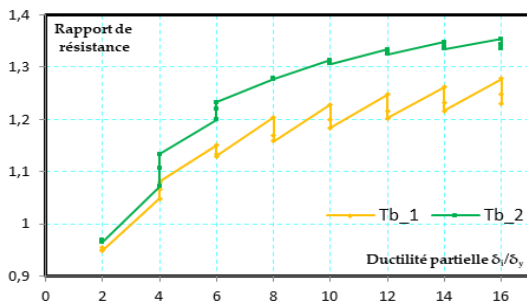


FIGURE 12. Rapport de résistance durant les cycles de chargement

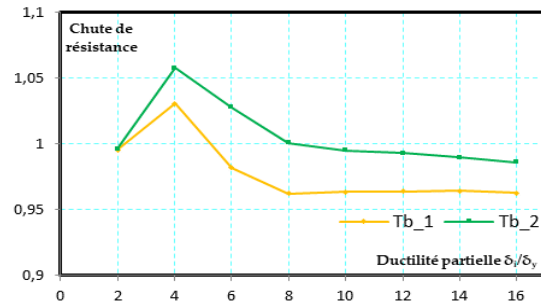


FIGURE 13. Chute de résistance durant les cycles de chargement

IV. CONCLUSION

Dans cette étude, un tronçon en té à deux boulons et un autre à quatre boulons par rangée ont été analysés. Cette étude a permis de tirer les conclusions suivantes concernant l'apport de l'ajout des boulons externes :

1. L'ajout des boulons externes permet d'éviter la formation d'un plateau horizontal qui était une caractéristique de la courbe $F-\delta$ cyclique du tronçon à deux boulons par rangée.
2. L'ajout d'une rangée de boulons externes permet d'éviter le soulèvement de l'extrémité libre observé dans le tronçon Tb1.
3. En se basant sur les paramètres clés donnés par la ECCS, il a été constaté que le tronçon Tb1 était vulnérable à la répétition du même cycle de chargement contrairement au tronçon Tb2.
4. Les boulons externes permettent de compenser la défaillance des boulons internes en phase de déchargement et offrent une résistance supplémentaire en phase de chargement.

REFERENCES

- A. Abidelah, A. Bouchaïr, D. Kerdal. (2012). Experimental and analytical behavior of bolted end-plate connections with or without stiffeners. *J. Constr. Steel Res.* 76 13-27. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.04.004>.
- A. Bouchaïr, J. Averseng, A. Abidelah. (2008). Analysis of the behaviour of stainless steel bolted connections. *J. Constr. Steel Res.* 64 1264–1274. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.009>.
- C. Bernuzzi, R. Zandonini, P. Zanon. (1996). Experimental analysis and modelling of semi-rigid steel joints under cyclic reversal loading. *J. Constr. Steel Res.* 38 95-123.
- CEN, Eurocode 3 (2005): Design of steel structures-Part 1-8: Design of joints. Brussels.
- E.A. Sumner, T. Murray. (2002). Behavior of extended end-plate moment connections subject to cyclic loading, *J. Struct. Eng.* 128 501-508.
- ECCS (1986). Technical Committee 1: structural safety and loadings: technical working group 1.3: seismic design, recommended testing procedure for assessing the behaviour of structural steel elements under cyclic loads.
- F. Iannone, M. Latour, V. Piluso, G. Rizzano. (2011). Experimental Analysis of Bolted Steel Beam-to-Column Connections: Component Identification. *J. Earthq. Eng.* 15 214-244. <https://doi.org/10.1080/13632461003695353>.
- H. Agerskov. (1976). High-Strength Bolted Connections Subject to Prying. *J. Struct. Div.* 102 161-175.
- J.F. Demonceau, K. Weynand, J.P. Jaspart, C. Müller. (2010). Application of Eurocode 3 to steel connections with four bolts per horizontal row. *Proceedings Stability and Ductility of Steel Structures, Rio de Janeiro, Brazil*, 199-206.
- M. Latour, G. Rizzano, A. Santiago, L. Simões da Silva. (2014). Experimental analysis and mechanical modeling of T-stubs with four bolts per row. *J. Const. Steel Res.* 101 158–174. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.004>.
- N. Gebbeken, H. Rothert, B. Binder. (1994). On the numerical analysis of endplate connections. *J. Constr. Steel Res.* 30 177-196. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(94\)90049-3](https://doi.org/10.1016/0143-974X(94)90049-3).
- N. Nematì, D. Le Houedec, R. Zandonini. (2000). Numerical modelling of the cyclic behaviour of the basic components of steel end plate connections, *Advances. Eng. Software.* 31 837-847. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(00\)00046-6](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(00)00046-6).
- O.S. Bursi, J.P. Jaspart. (1998). Basic issues in the finite element simulation of extended end plate connections. *Comput and Struct.* 69 361-382. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00136-9](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00136-9).
- S. Haouas, A. Abidelah, D. Kerdal, A. Bouchaïr. (2019). The mechanical behaviour of T-stubs with four bolts per row, *Proc. Inst. Civ. Eng.* 172 882–901. <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00055>.
- V. Piluso, G. Rizzano. (2008). Experimental analysis and modelling of bolted T-stubs under cyclic loads, *J. Constr. Steel Res.* 64 655-669. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.12.009>.
- Z. Al-Khatàb, A. Bouchaïr. (2007). Analysis of a bolted T-stub strengthened by backing-plates with regard to Eurocode 3. *J. Constr. Steel Res.* 63 1603-1615. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.01.012>.