

Zone comprimée de l'assemblage poutre-poteau avec des raidisseurs partiels.

Sabra BOUGOFFA ^{1,2}

¹ Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France.

² Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, LGC, BP 37, le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisie.

RESUME La zone de compression dans les assemblages poutre-poteau est généralement la zone faible vis-à-vis aux efforts de compression. Cette zone implique généralement le renfort via l'utilisation des raidisseurs. Soit des raidisseurs transversaux dont la configuration est le paramètre à jouer sur lors de cette recherche. L'article présente, ainsi, les résultats d'essais expérimentaux visant à évaluer la résistance des profilés métalliques avec différentes configurations de raidisseurs transversaux soumis à une charge localement concentrée. Douze panneaux constitués de sections en IPE (I à Profilés Européen, laminées à chaud) ou de sections en PRS (Profilés Reconstitués Soudés) ont été testés. Différentes configurations de raidisseurs transversaux accompagnants ces profilés ont été étudiés, notamment des raidisseurs faisant toute la hauteur de l'âme à simple face ou à double face et des raidisseurs partiels. Les principaux résultats observés sont la résistance ultime et le mode de ruine

Mots-clefs raidisseurs transversaux, assemblage poutre-poteau, essais expérimentaux.

I. INTRODUCTION

On distingue entre les assemblages boulonnés et les assemblages par soudure (*Eurocode 3 : Design of steel structures – Part 1-8 : Design of joints*, 2010) pour les jonctions poutre à poutre, poteau à poteau ou poutre à poteau. Cette dernière est une connections qui peut être symétrique ou non (Girão Coelho, 2017). Selon la norme EN1993-1-8, un assemblage poutre poteau transférant un moment de flexion peut être analysée en considérant isolément la zone de traction, la zone de compression et la zone de cisaillement. Le comportement de chaque composante est défini selon la sollicitation y est appliquée, et toutes les composantes sont combinées pour obtenir celui de la connexion entière. Au cours des dernières décennies, de nombreuses études numériques et expérimentales ont porté sur le comportement des zones de traction dans les assemblages poutre-poteau avec ou sans raidisseurs. La zone de traction est représentée par le tronçon en T (Abidelah, Bouchaïr and Kerdal, 2012). Les T-stub renforcés par des plaques d'appui ont également été analysés par Al-Khatib et Bouchaïr (Al-Khatib and Bouchaïr, 2007). La zone de compression a été également analysée dans l'assemblage poutre-poteau mais faiblement détaillé et que dans

quelques études basées sur des investigations expérimentales avec une approche analytique (Bose, McNeice and Sherbourne, 1972), calibrée sur la base des résultats expérimentaux existants qui a été proposée pour analyser les contraintes dans l'âme du poteau dans l'assemblage poutre-poteau. Dans cette dernière étude, la possibilité d'isoler l'âme de l'assemblage entier pour déterminer sa résistance est vérifiée en considérant des panneaux raidis et non raidis. Un nombre limité d'études a analysé le comportement des panneaux d'âme raidis et non raidis sous compression pour différentes sections transversales. Graham et al (Graham *et al.*, 1959) ont réalisé une étude expérimentale sur des poutres laminées américaines avec différents types de raidisseurs. Ils ont testé des joints soudés de poutre entière à colonne en flexion et des poutres isolées sous compression et traction directe. Ils ont analysé la relation entre les deux types d'essais illustrés à la figure 1. Ils ont comparé les résultats expérimentaux avec les formules analytiques de conception existantes concernant la résistance en faisant quelques adaptations pour les cas avec raidisseurs. Ils ont indiqué que le développement d'une approche analytique pour les raidisseurs nécessite la connaissance de la distribution des contraintes et des conditions aux limites. La principale approche analytique était basée sur la résistance plastique de la zone comprimée définie par la longueur effective. De Mita et al (De Mita, Piluso and Rizzano, 2008) ont réalisé une étude expérimentale sur des profils européens usuels laminés à chaud et ont comparé les résultats avec les formules analytiques existantes prenant en compte la résistance, la rigidité initiale et la capacité de déformation. Les tests étaient réalisés sur des panneaux comprimés par une double charge de compression localisée.

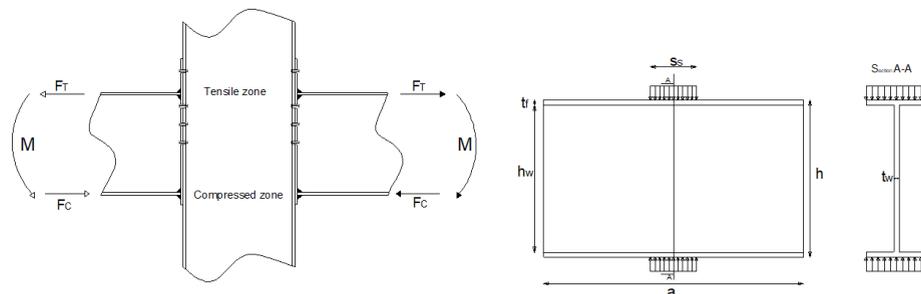


Figure 1. Assemblage poutre-poteau et modèle de profilé équivalent à la zone comprimée.

Le comportement des profils non raidis soumis à une double charge de compression a été largement étudié par des analyses expérimentales, numériques et théoriques. La charge ultime supportée par un profilé non raidi comprimé est donnée par la norme EN1993-1-5 (Européenne and Norm, 2006) en considérant l'analogie avec les problèmes d'instabilité (appelée l'approche χ - λ). Avec cette approche, la résistance plastique est réduite par un facteur tenant compte de l'instabilité. Ces études permettent de donner l'analyse d'un profilé non raidi, et de présenter le comportement de la partie comprimée d'un assemblage et qui présente évidemment des risques d'instabilités qui augmentent avec l'augmentation de l'élançement de l'âme de cette partie. Pour améliorer la résistance des panneaux d'âme dans les zones comprimées des assemblages, des plaques d'âme supplémentaires ou des raidisseurs peuvent être utilisés (EN1993-1-8). Différentes configurations de raidisseurs sont utilisées dans la pratique pour renforcer les panneaux d'âme. Les raidisseurs peuvent être soudés sur un côté de l'âme du profilé (simple face) ou sur les deux côtés (double face). En général, les raidisseurs d'appui sont double face, tandis que les raidisseurs d'âme intermédiaires sont simple face. En fonction de leur position, les raidisseurs peuvent être

inclinés, longitudinaux ou transversaux. Les raidisseurs inclinés sont utilisés dans le cas des assemblages poutre-poteau non symétriques. Les raidisseurs longitudinaux sont des raidisseurs dans la direction parallèle à celle des semelles. Ils sont principalement utilisés pour renforcer les poutres de grandes dimensions. Leur comportement dans les poutres comprimées a été étudié à l'aide d'une analyse numérique basée sur des essais existants ou des modèles théoriques (Kövesdi, 2018). Les raidisseurs longitudinaux sont également utilisés pour éviter le voilement de l'âme qui peut entraîner une réduction considérable de la résistance à la flexion des poutres (Graciano, 2015). Les raidisseurs transversaux sont installés dans la direction perpendiculaire à celle des semelles. Le raidisseur plat simple est le type généralement utilisé dans les constructions modernes pour résister à la compression et au cisaillement des panneaux (Lee, Yoo and Yoon, 2001). Les raidisseurs transversaux, dont l'épaisseur est au moins égale à celle du panneau raidi, sont soudés sur toute la hauteur du panneau d'âme et des semelles. Dans les assemblages boulonnés, le raidisseur situé dans la zone de compression doit être aligné avec les semelles de la poutre (centre de compression). De nombreuses études numériques sont réalisées pour déterminer la résistance des plaques comprimées soumises à une compression plane. Choi et al (Choi, Kang and Yoo, 2007) ont réalisé une étude par éléments finis pour analyser le comportement des raidisseurs transversaux dans les panneaux d'âme chargés en compression en tenant compte de leurs exigences de rigidité conformément aux spécifications de l'AASHTO (Aashto, 2010). K. Le Tran (Tran, Et and Stabilit, 2012) a expliqué l'approche proposée par la norme EN19933-1-5 pour déterminer la résistance des plaques raidies transversalement par un ou plusieurs raidisseurs, soumises à une charge de compression uniforme. Les étapes de calcul, basées initialement sur les raidisseurs longitudinaux, considèrent deux types de comportements et leur interaction : le flambement de type colonne, le flambement de type plaque et l'interaction entre le flambement de la plaque et de la colonne par le biais d'un coefficient calibré.

Le présent article propose une étude expérimentale des raidisseurs transversaux soudés au panneau d'âme soumis à une charge de compression opposée. En effet, ce type de raidisseurs peut être l'un des choix les plus appropriés pour renforcer la zone comprimée dans la colonne des assemblages poutre-poteau. Différentes longueurs et positions des raidisseurs sur la hauteur des panneaux d'âme sont testées. Les spécimens testés peuvent représenter le comportement de la zone de compression dans des panneaux entièrement ou partiellement renforcés. Douze sections en IPE et PRS avec des raidisseurs ont été testées jusqu'à la rupture. Les essais sont utilisés pour observer le comportement des panneaux raidis avec différentes configurations de raidisseurs transversaux soumis à la double charge de compression localisée.

II. Etude expérimentale

Les douze spécimens testés visent à représenter la zone comprimée dans un panneau d'âme de poteau d'un assemblage poutre-poteau symétrique. Six spécimens ont été prélevés dans des sections en IPE et les six autres sont des sections en PRS. Dans chaque groupe de six éprouvettes, un est sans raidisseur afin d'obtenir une référence comme profilé non renforcé. Les cinq spécimens renforcés ont différentes positions ou dimensions de raidisseurs (voir Fig.2 et Tableau 1). L'épaisseur de l'âme est égale à 5.5, 7.1 ou 12.3 mm. Les épaisseurs des raidisseurs sont égales à

5,5 et 8 mm. Les raidisseurs sont soudés soit sur toute la hauteur de l'âme et des semelles, soit sur une partie de l'âme et des semelles, soit sur une partie de la hauteur de l'âme (voir figure 2).

La profondeur des raidisseurs est choisie en fonction de la hauteur du panneau d'âme, ce qui donne les résultats suivants :

$h_s = h_w$ (pour les raidisseurs soudés sur toute la hauteur du panneau d'âme et des semelles),

$h_s = 5/6 h_w$ (pour les raidisseurs soudés sur une partie de la hauteur du profilé et/ou pas sur les semelles).

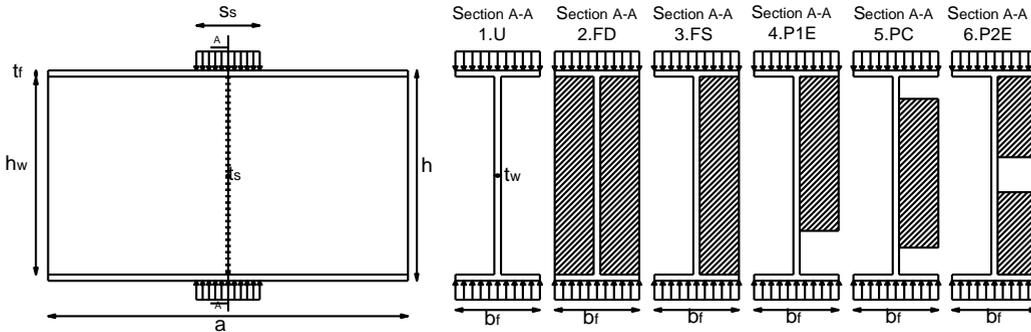


Figure 2. Les configurations des éprouvettes d'essai

Tableau 1. Descriptions et nomenclatures des configurations d'essai

Configuration	Description
Conf. 1	Unstiffened section, "1.U"
Conf. 2	Double transverse stiffeners on the Full web height (welded to web and flanges), "2.FD"
Conf. 3	Single transverse stiffener on the Full web height (welded to web and flange), "3.FS"
Conf. 4	Partial transverse stiffener (welded to web and one End flange), "4.P1E"
Conf. 5	Partial transverse stiffener on the Central part of the web height (welded to web), "5.PC"
Conf. 6	Partial transverse stiffener on two parts of the web (welded to web and two End flanges), "6.P2E"

*Chaque profilé est sous nommé comme suit : description-nature du profilé (H signifie hot rolled sections

(IPE) et $W_{\lambda_1, \text{ou } \lambda_2}$ signifie welded sections (PRS)

Les essais ont été réalisés à l'aide d'une machine d'essai de compression. La force de compression est appliquée à travers deux plaques d'acier rigides symétriques des deux côtés avec une largeur S_s de 100 mm appliquée sur les semelles de part et d'autre. La charge est appliquée avec un taux de déplacement constant et l'essai est arrêté lorsque la charge maximale est atteinte, suivie d'un déplacement significatif développé dans la phase de post-ruine. La diminution de la charge au-delà de la valeur maximale représente l'instabilité de l'éprouvette. Le déplacement mesuré est celui de la partie mobile de la machine d'essai. Cette partie mobile introduit la charge par l'intermédiaire d'une plaque rigide articulée avec une petite rotation libre.

La comparaison des courbes expérimentales charges-déplacements entre des éprouvettes ayant les mêmes géométries avec différentes configurations de raidisseurs (complets, partiels) est faite pour montrer la contribution des raidisseurs. Comme le montre la figure.3 (a) pour les sections en IPE, les différences apparaissent à partir de la phase linéaire. Comme les essais sont réalisés dans les mêmes conditions, cela confirme le fait que les rigidités initiales des panneaux sont différentes

avec des valeurs plus élevées pour les cas avec raidisseurs. La rigidité la plus élevée est obtenue pour les raidisseurs double faisant toute la hauteur. Dans la phase non linéaire, tous les cas, à l'exception de celui sans raidisseurs, montrent une longue phase plastique avant la diminution de la charge représentant l'instabilité. La figure 3 (b) combine les courbes expérimentales pour les sections en PRS en considérant chacune des deux épaisseurs d'âme.

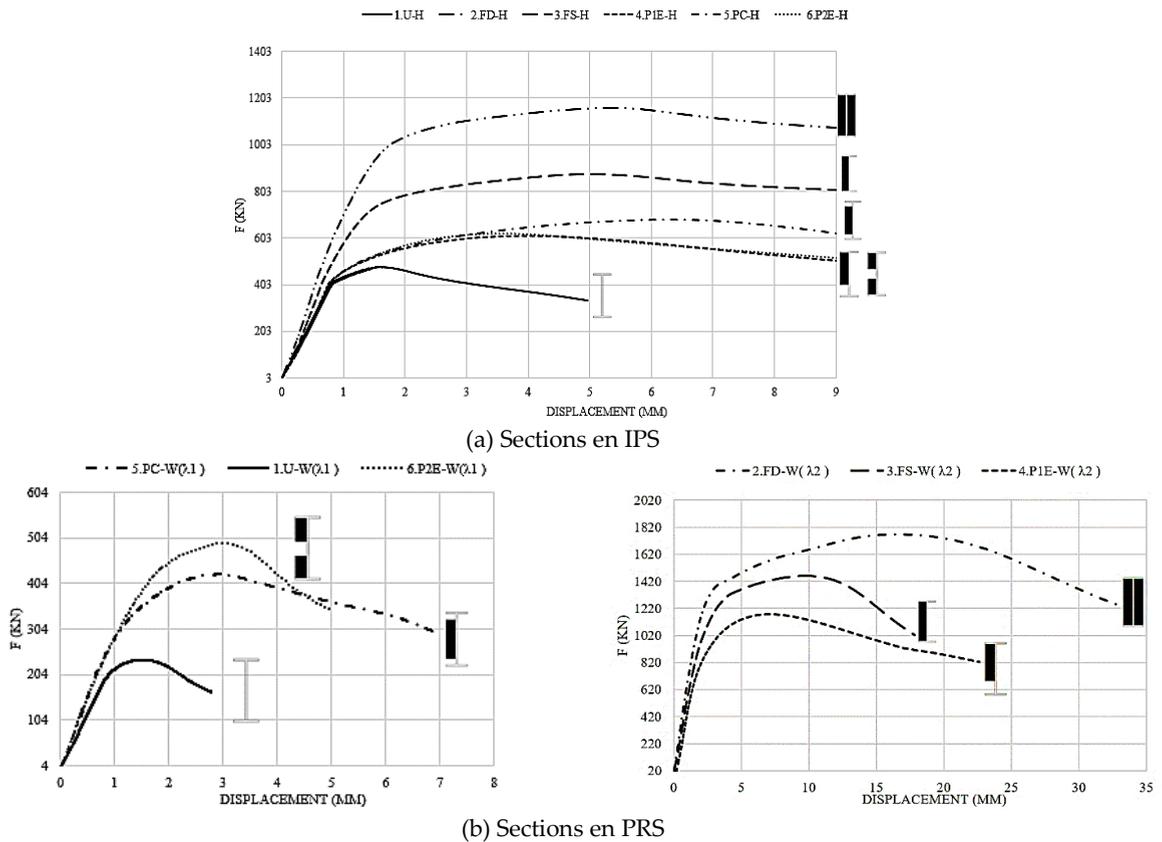


Figure 3. Résultats des essais expérimentaux sous forme de courbes charges-déplacements

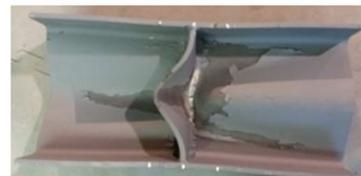
Les conclusions à retenir à partir des concernes généralement le comportement résistant global des configurations testées.

Les résultats en modes de ruine observés à la fin de chaque essai permettent de bien comprendre le comportement de chaque configuration et pour chaque spécification géométrique. Les modes de ruine des sections en IPE et des sections en PRS testées sont résumés à la figure 4. Les photos ont été prises après chaque essai expérimental. Les modes de ruine montrent les déformations localisées associées aux éprouvettes. Pour le profilé de la figure.4 (a), l'âme est le seul élément qui est déformé. Elle subit un voilement sous la forme d'une demi-onde. En ce qui concerne les profilés de la figure 4 (b) et de la figure 4 (c), l'âme se déforme de manière asymétrique des deux côtés du raidisseur et le raidisseur est déformé. Il s'agit d'un flambement par torsion où le raidisseur est déformé avec un angle de rotation autour de l'axe de flexion. L'âme du panneau de la figure 4 (d) subit une déformation près de la face inférieure du raidisseur qui ne se déforme pas avec une rotation prononcée de la partie non raidie de l'âme. Ainsi, le raidisseur renforce la partie raidie en flexion et joue le rôle de transmetteur de charge à la partie non raidie du panneau d'âme.

En ce qui concerne le panneau d'âme de la figure 4 (e), l'âme est déformée sur ses parties non raidies aux extrémités des raidisseurs. Elle subit un voilement de demi-onde alors que le raidisseur ne se déforme pas, les semelles subissent une déformation dans la direction de l'application de la charge, qui peut être similaire au premier théorème de l'analyse des limites qui définit les rotules plastiques potentielles dans les semelles et les lignes d'élasticité potentielles dans le panneau d'âme de chaque côté du raidisseur intermédiaire. Enfin, on observe que pour le panneau de la figure 4 (f), la partie non raidie de l'âme est le seul élément qui se déforme en flexion et le raidisseur reste indéformé. Ce cas peut être considéré comme similaire à celui de la figure 4 (d). Pour les sections en PRS, dans le profilé non raidi (figure 4 (g)), l'âme est le seul élément qui se déforme, son épaisseur est la plus faible et les semelles sont indéformables. Il faut noter que pour les configurations montrées dans les figures 4 (k) et figure 4 (l), où le raidisseur et l'âme ont la même épaisseur, l'âme raidie est déformée mais avec une amplitude moins importante que l'âme non raidie. On a également remarqué que pour l'éprouvette de la figure 4 (k), les semelles sont plastifiées autour des points de chargement. Cela peut être la source de la diminution de la valeur de la charge ultime. Dans le cas de profilés entièrement raidis par un raidisseur double ou simple (figure 4 (h) et figure 4 (i)), le raidisseur est la section la plus affectée et il subit un flambement avec des formes différentes. Cependant, sur la figure 4 (j), la déformation est localisée dans la partie non raidie de l'âme. Le raidisseur, bien qu'il soit plus fin que l'âme, il joue le rôle de transmetteur de charge à la partie non raidie de l'âme. Les semelles restent indéformées. Cependant, elles ont cédé localement dans les cas avec raidisseurs symétriques sur toute la hauteur (voir figure 4 (h) et figure 4 (i)). Les formes des déformées des profilés non raidis montrées à la figure 4 (a) et figure 4 (g) ont quelques similarités avec celles observées dans les éprouvettes partiellement raidis montrés à la figure 4 (e), figure 4 (f), figure 4 (k) et figure 4 (l). En observant les éprouvettes dont l'âme est entièrement raidie dans les sections en IPE (figure 4 (b), figure 4 (c)) et les sections en PRS (figure 4 (h), figure 4 (i)), la forme de déformée du raidisseur (deux ondes ou une onde locale) dépend de son épaisseur par rapport à celle de l'âme. Si le raidisseur a la même épaisseur que l'âme, il subit une onde complète. Bien que l'épaisseur du raidisseur soit inférieure à celle de l'âme, le panneau partiellement raidi de la figure 4 (j) se comporte de la même manière que le panneau avec le même raidisseur mais une épaisseur égale à celle de l'âme.



(a) Mode de ruine de 1.U-H



(b) Mode de ruine de 2.FD-H



(c) Mode de ruine de 3.FS-H



(d) Mode de ruine de 4.P1E-H

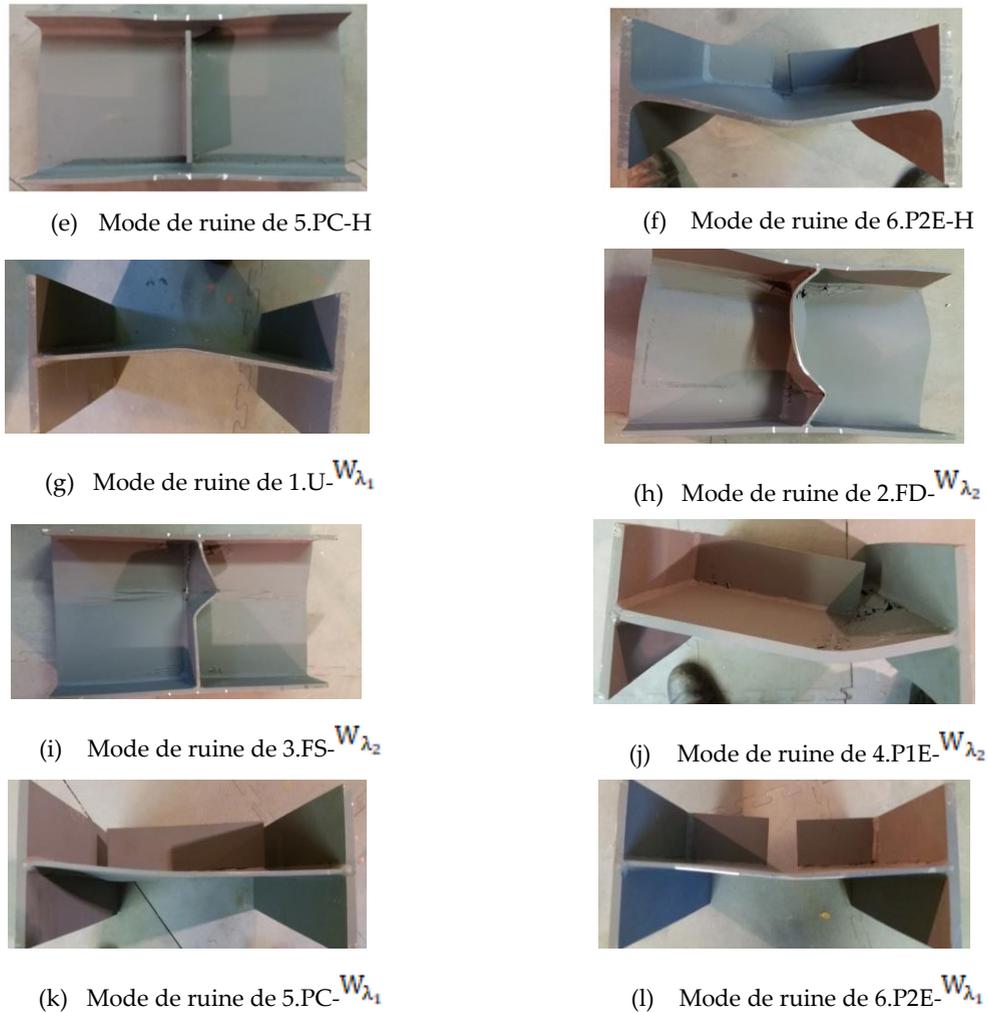


Figure 4. Modes de ruine

III. Conclusions

Dans cet article, un programme expérimental de douze panneaux de poutre en I soumis à une double charge de compression localisée est réalisé. Les âmes des profilés sont entièrement ou partiellement raidis avec différentes positions de raidisseurs. Il a été observé que le comportement de l'âme d'un panneau avec des raidisseurs transversaux sous une charge de compression est fortement influencé par les dimensions et la localisation des raidisseurs. De plus, dans le cas raidi entièrement, le raidisseur est celui qui pilote le comportement global du profilé raidi, cependant, dans le cas raidi partiellement, c'est la partie non raidie qui décrit le comportement de ce type de profilés. Les panneaux entièrement raidis subissent un flambement par torsion avec des raidisseurs simples ou doubles sur toute la hauteur. Cette étude est complétée par une étude numérique ce qui permet de mieux expliquer les résultats des essais expérimentaux et de construire une étude paramétrique dans le but de bien comprendre le comportement de certaines configurations de raidisseur. Une évaluation des expressions analytiques donnée par l'EN est aussi effectuée. L'étude complète est publiée sous forme d'un article scientifique (Bougoffa *et al.*, 2021).

REFERENCES

- Aashto (2010) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Chemistry &* doi: 10.1111/febs.12237.
- Abidelah, A., Bouchaïr, A. and Kerdal, D. E. (2012) 'Experimental and analytical behavior of bolted end-plate connections with or without stiffeners', *Journal of Constructional Steel Research*, 76, pp. 13–27. doi: 10.1016/j.jcsr.2012.04.004.
- Al-Khatib, Z. and Bouchaïr, A. (2007) 'Analysis of a bolted T-stub strengthened by backing-plates with regard to Eurocode 3', *Journal of Constructional Steel Research*, 63(12), pp. 1603–1615. doi: 10.1016/j.jcsr.2007.01.012.
- Bose, S. K., McNeice, G. M. and Sherbourne, A. N. (1972) 'Column webs in steel beam-to-column connexions part II-Design recommendations', *Computers and Structures*, 2(1–2), pp. 281–301. doi: 10.1016/0045-7949(72)90031-4.
- Choi, B. H., Kang, Y. J. and Yoo, C. H. (2007) 'Stiffness requirements for transverse stiffeners of compression panels', *Engineering Structures*, 29(9), pp. 2087–2096. doi: 10.1016/j.engstruct.2006.11.002.
- Eurocode 3 : Design of steel structures – Part 1-8 : Design of joints* (2010).
- Europeenne, N. and Norm, E. (2006) *EUROPEAN STANDARD Eurocode 3-Design of steel structures-Part 1-5: Plated structural elements*.
- Girão Coelho, A. M. (2017) 'Numerical approach to the evaluation of the transformation parameter β' ', *Journal of Constructional Steel Research*, 133, pp. 405–417. doi: 10.1016/j.jcsr.2017.02.031.
- Graciano, C. (2015) 'Patch loading resistance of longitudinally stiffened girders - A systematic review', *Thin-Walled Structures*, 95, pp. 1–6. doi: 10.1016/j.tws.2015.06.007.
- Graham, J. D. *et al.* (1959) 'Welded interior beam-column connections , AISC', 146(146).
- Kövesdi, B. (2018) 'Patch loading resistance of slender plate girders with longitudinal stiffeners', *Journal of Constructional Steel Research*, 140, pp. 237–246. doi: 10.1016/j.jcsr.2017.10.031.
- Lee, S. C., Yoo, C. H. and Yoon, D. Y. (2001) 'Behavior of transverse stiffeners attached on shear web panels', *Proceedings - Annual Technical Session, Structural Stability Research Council*, (March), pp. 529–548.
- De Mita, L., Piluso, V. and Rizzano, G. (2008) *Theoretical and Experimental Analysis of Column Web in Compression, The Open Construction and Building Technology Journal*.
- Tran, K. Le, Et, S. and Stabilit, D. E. L. A. (2012) 'oles courbes cylindriques en acier : applications aux ouvrages d ' art Docteur de l ' Universit ''.
- Bougoffa, S. *et al.* (2021) 'Compression zone with partial stiffeners in beam-to-column steel connections', 229(November 2019). doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111674.