



Software pour l'Architecture et
l'Ingénierie de la Construction



CYPE Connect

Mémoire de Calcul

Modélisation et analyse d'assemblages pour les structures en acier. Cette application est intégrée dans le flux de travail Open BIM via la plateforme BIMserver.center.

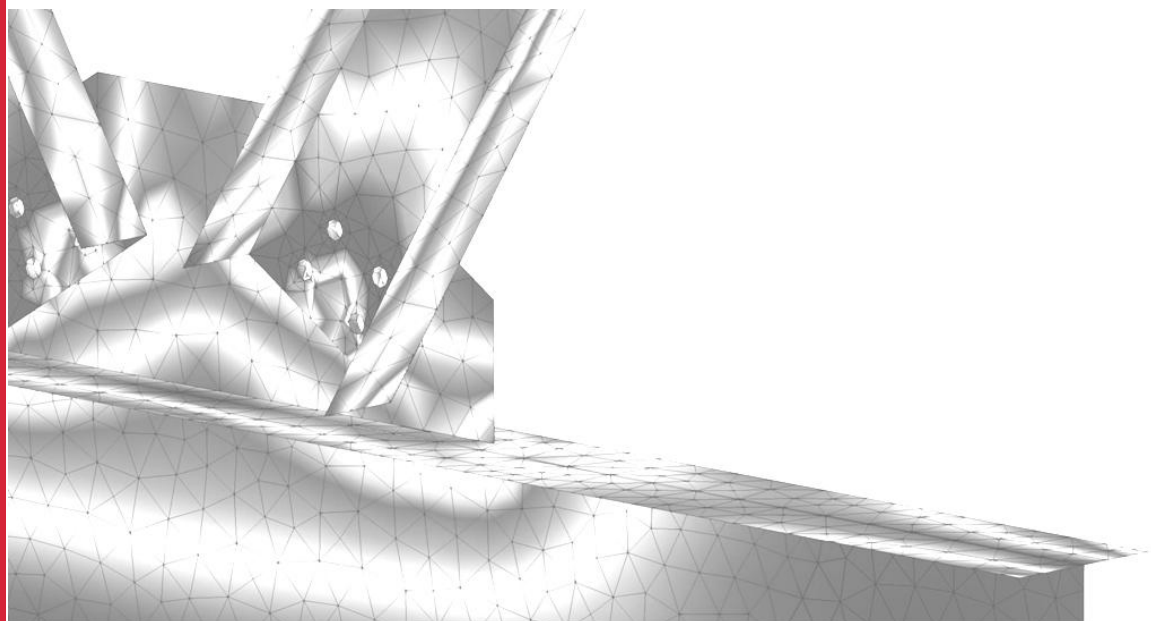




Table des matières

1	Analyse.....	3
1.1	Introduction	3
1.2	Modèle de plaque	4
1.3	Soudures.....	5
1.4	Boulons.....	6
1.4.1	Comportement de la tige.....	6
1.4.2	Transmission des forces de traction à la plaque	9
1.4.3	Comportement de l'appui.....	10
1.4.4	Transmission de charges	11
1.5	Contact.....	12
1.6	Charges et conditions de contour	12
1.6.1	Appuis.....	12
1.6.2	Charges	13
2	Références	15

1 Analyse

1.1 Introduction

Le calcul d'assemblages est l'un des problèmes les plus complexes de l'ingénierie structurale. Au fil des ans, la manière habituelle de traiter ce problème a consisté à utiliser des hypothèses simplificatrices et l'expérience, par des calculs manuels ou des feuilles de calcul. Il n'y a pas si longtemps, il n'y avait pas de nécessité légale de valider des dizaines ou des centaines de combinaisons de charges et les facteurs de sécurité étaient plus élevés qu'aujourd'hui.

Actuellement, les restrictions de conception sont plus nombreuses et les facteurs de sécurité ont été réduits, ce qui fait de l'exactitude dans les calculs un aspect crucial.

La manière traditionnelle de traiter le calcul d'assemblages peut être utile dans certaines situations, mais nous sommes aujourd'hui confrontés à des conceptions plus complexes.

Lorsque la structure est analysée au moyen d'un modèle de barres, un modèle détaillé des assemblages qui la composent n'est pas réalisé. Pour concevoir correctement l'assemblage, il est nécessaire de générer un modèle d'attache qui respecte la disposition réelle de l'assemblage. Il faut également tenir compte des forces qui s'exercent aux extrémités des éléments composant l'assemblage, qui sont obtenues à partir de la résolution du calcul de la structure.

En utilisant l'analyse par éléments finis, il est possible de résoudre ce problème avec plus d'efficacité et de précision.

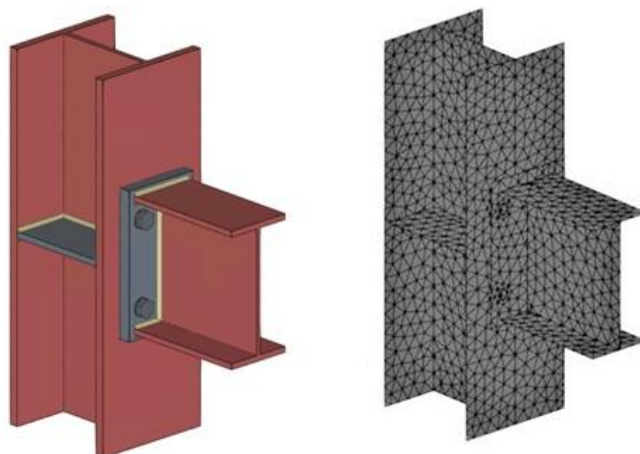
CYPE Connect est un outil qui permet la génération de modèles d'assemblages de structures métalliques basés sur les éléments finis, ainsi que leur calcul et leur vérification selon des critères normatifs. Ceci, avec une intervention minimale ou nulle de l'utilisateur, en utilisant le software d'éléments finis mondialement connu OpenSees [1] comme moteur de calcul.

Dans les modèles par éléments finis générés par CYPE Connect, trois éléments principaux sont distingués : les plaques, les soudures et les boulons.

Les plaques constituent tous les éléments plans (la dimension de l'épaisseur est beaucoup plus petite que le reste des dimensions) qui interviennent dans le modèle structural de l'assemblage, comme, par exemple, les éléments plans formant les profilés métalliques, les plaques utilisées pour réaliser des assemblages boulonnés, les raidisseurs, etc. Dans la figure 1.1, il est possible d'observer une comparaison entre le modèle géométrique réel de

l'assemblage et le modèle discrétisé de celui-ci. Ce modèle de plaque sera décrit plus en détail dans la section 1.2.

Les boulons et les soudures sont les éléments d'attache du modèle et leurs caractéristiques seront décrites plus en détail dans les sections 1.3 et 1.4.



(a) Modèle géométrique réelle de l'assemblage.

(b) Modèle discrétisé de l'assemblage.

Figure 1.1. Discretisation des plaques par éléments finis.

1.2 Modèle de plaque

Dans les structures où l'épaisseur est nettement inférieure aux autres dimensions, comme dans le cas des plaques formant des structures métalliques, les éléments type *Shell* constituent une bonne solution (section 29.6.1 de la référence [2]). L'élément utilisé sera l'élément triangulaire Shell NLDKGT [3] avec trois nœuds.

Ces éléments tiennent compte du comportement de membrane (contrainte dans le plan, compression, cisaillement et moment torsion) et du comportement de plaque (moment hors du plan). Dans le domaine non linéaire, le comportement de la plaque est modélisé à l'aide de sections en couches. L'épaisseur de la plaque est divisée en un certain nombre de couches (dans ce cas 5) où le problème à résoudre est la déformation plane. Le calcul des moments de flexion est effectué en additionnant les effets de chaque couche et il n'est plus possible de considérer que les contraintes dans l'épaisseur de la plaque sont obtenues en additionnant les effets de la membrane et du comportement en flexion comme ce serait le cas en analyse linéaire (section 9.2.4 de la référence [4]).

Dans les éléments finis, des techniques d'intégration numérique sont utilisées pour calculer les intégrales nécessaires. Si la non-linéarité du matériau est activée, l'intégration numérique nécessaire pour calculer la matrice de rigidité n'est pas seulement effectuée sur la surface (où des points de Gauss sont utilisés), mais aussi sur l'épaisseur.

Ce modèle de plaque est employé pour discrétiser les éléments plans formant les profilés métalliques et pour discrétiser d'autres plaques qui interviennent dans le modèle structural, telles que les plaques utilisées pour réaliser des assemblages boulonnés ou des raidisseurs. En bref, ce modèle de plaque sert à discrétiser tout élément plan impliqué dans le modèle structural de l'assemblage.

Les diagrammes de matériaux les plus couramment utilisés dans la modélisation par éléments finis de l'acier structural sont le modèle plastique idéal ou le modèle élastique idéal avec écrouissage. La loi constitutive sélectionnée pour les plaques et les profilés est une loi constitutive bilinéaire avec une pente dans la section plastique $\tan^{-1}(E/1000)$.

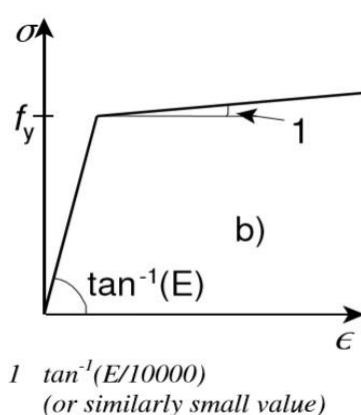


Figure 1.2. Loi de comportement de l'acier dans les plaques [5].

1.3 Soudures

Les soudures sont l'un des éléments connecteurs dans les assemblages. Il existe plusieurs options pour modéliser les soudures.

Une option largement utilisée pour la modélisation des soudures, qui est celle utilisée dans CYPE Connect, est l'attache directe entre les plaques à souder au moyen de contraintes force-déformation, également appelées contraintes multipoints (Multi Point Constraints). La technique de modélisation des soudures par liaisons rigides a été suggérée par Fayard et Bignonnet (1996) [6], et est basée sur la modélisation de la rigidité locale des assemblages soudés en assemblant deux éléments *Shell* adjacents par leurs nœuds le long de la soudure. L'utilisation de liaisons rigides pour la modélisation des soudures peut être

trouvée dans plusieurs articles scientifiques tels que ceux des références [7], [8], [9] ou [10].

Dans CYPE Connect, les nœuds à l'extrémité de la surface à souder sont projetés perpendiculairement sur la surface à souder. Des liaisons rigides relient chacun des nœuds à l'extrémité de la surface à souder et les nœuds projetés. De plus, ces nœuds projetés sont associés par MPC aux nœuds environnants en tenant compte des fonctions d'interpolation du champ de déformations de l'élément sur lequel le nœud est projeté. En appliquant cette méthode, l'épaisseur de la gorge de la soudure est respectée ainsi que la configuration réelle de la soudure.

Le principal avantage de cette méthode est qu'elle permet de connecter des mailles de différentes densités. La figure 1.3 montre la modélisation de la soudure via des éléments rigides et MPC dans CYPE Connect.

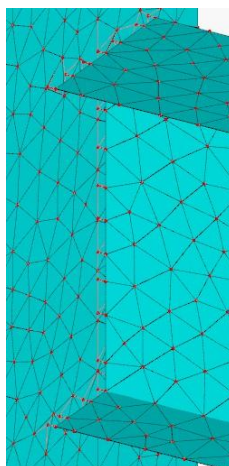


Figure 1.3. Modélisation de soudures dans CYPE Connect.

1.4 Boulons

Trois comportements sont différenciés dans les éléments qui modélisent les boulons : le comportement en traction et en cisaillement de la tige du boulon, la transmission des forces de traction à la plaque et le comportement de l'appui de la plaque sur le boulon.

1.4.1 *Comportement de la tige*

Des ressorts non linéaires simulant le comportement en traction et des ressorts linéaires simulant le comportement en cisaillement sont utilisés pour modéliser le comportement de la tige du boulon. Les raideurs initiales sont obtenues à partir des normes correspondantes. Pour modéliser le comportement élastoplastique de la tige en traction, une loi de matériau bilinéaire est utilisée, qui est basée sur les courbes de contrainte-

déformation des boulons proposées dans différents travaux de recherche tels que ceux de la référence [11], dans lesquels il est considéré que la contrainte ultime se produit pour une déformation de 5%. La loi bilinéaire de ce comportement est illustrée dans la figure 1.4.

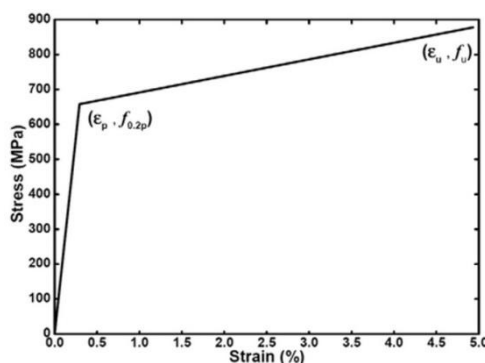


Figure 1.4. Diagramme contrainte-déformation du boulon [11]

Ce modèle de tige de boulon utilisant des éléments de type ressort avec des raideurs obtenues à partir de normes se retrouve également dans d'autres articles scientifiques, tels que la section 7.5 de la référence [4].

Ci-dessous se trouve un exemple des équations représentant ces lois bilinéaires en appliquant les rigidités qui figurent dans l'Eurocode.

Comportement en traction

La loi bilinéaire force-déplacement du comportement en traction, basée sur la loi de comportement mentionnée ci-dessus dans la section 1.4.1, est présentée dans la figure 1.5.

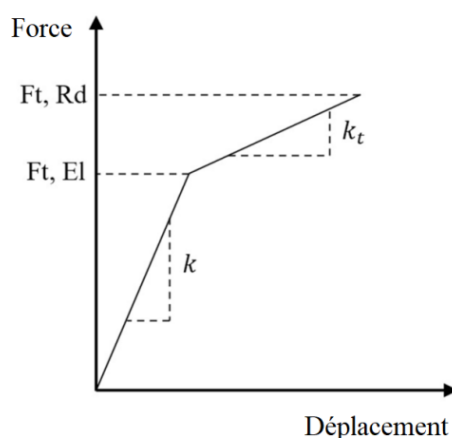


Figure 1.5. Diagramme force-déplacement du boulon en traction.

Selon le tableau 6.3.2 de la norme EN1993-1-8 [12], la rigidité initiale k est :

$$k = \frac{EA_s}{L_s} \quad (1.1)$$

où E est le module d'élasticité du boulon, A_s est l'aire de la section transversale du boulon effective en traction (aire filetée) et L_b la longueur soumise à allongement, c'est-à-dire la longueur de serrage du boulon (somme des épaisseurs des éléments maintenus par le boulon), l'épaisseur des rondelles, la moitié de l'épaisseur de l'écrou et la moitié de l'épaisseur de la tête du boulon.

Les équations décrivant la loi bilinéaire sont :

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (1.2)$$

$$F_{t,El} = \frac{k_2 f_{yb} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (1.3)$$

$$c = \left(\frac{f_{us} - f_{yb}}{0,05 - \frac{f_{yb}}{E}} \right) / E \quad (1.4)$$

$$k_t = c \cdot k \quad (1.5)$$

où

- $F_{t,Rd}$: La résistance à la traction du boulon, selon la norme EN1993-1-8, tableau 3.4 [12]
- $k_2 = 0.9$ (0.63 pour les boulons fraisés)
- f_{ub} : Contrainte ultime du boulon (ISO 898:2013 [13])
- f_{yb} : Contrainte de limite élastique du boulon (ISO 898:2013 [13])
- γ_{M2} : Facteur partiel EN1993-1-8 tableau 2.1 [12] (valeur recommandée $\gamma_{M2} = 1,25$)

Comportement en cisaillement

Selon ce qui est mentionné dans la référence [4], le comportement en cisaillement de la tige du boulon peut être modélisé par un ressort linéaire d'une rigidité donnée.

Selon le tableau 6.3.2 de la norme EN1993-1-8, la rigidité du boulon en cisaillement k est :

$$k = \frac{16n_b d^2 f_{ub}}{d_{M16}} \quad (1.6)$$

- n_b : Nombre de rangées de boulons en cisaillement
- d : Diamètre du boulon
- d_{M16} : Diamètre nominal d'un boulon M16, 16 mm

En tenant compte de ce qui est indiqué dans la référence [4], la rigidité en cisaillement d'un boulon peut être considérée comme :

$$k = \frac{8d^2 f_{ub}}{d_{M16}} \quad (1.7)$$

1.4.2 Transmission des forces de traction à la plaque

Le maillage de la plaque avec le trou pour le boulon doit être effectué comme indiqué dans la figure 1.6.

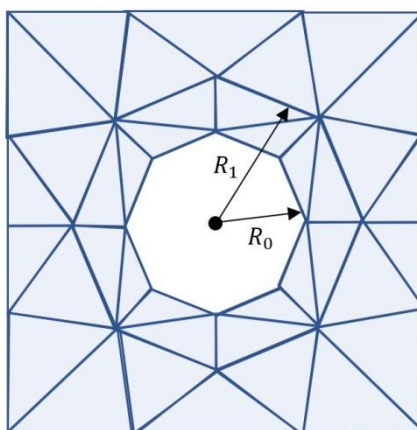


Figure 1.6. Maillage de la plaque avec un trou.

Le diamètre du trou est $D = 2R_0$ et le paramètre R_1 représente la longueur des liaisons décrites ci-dessous.

Le comportement de transmission des forces de traction à la plaque est modélisé par des liaisons rigides entre le nœud du centre de l'ouverture et les nœuds de l'octogone

extérieur qui transmettent les forces de traction dans la direction perpendiculaire au plan des plaques attachées.

La figure 1.7 montre la connexion de ces liaisons d'interpolation avec les nœuds de la plaque.

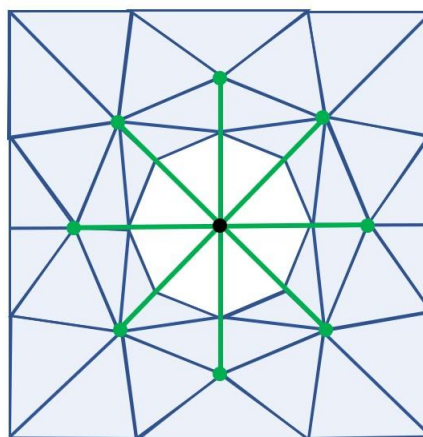


Figure 1.7. Représentation des liaisons de connexion (éléments en vert) avec les nœuds de la plaque.

1.4.3 Comportement de l'appui

Le comportement de l'appui est modélisé au moyen de liaisons entre le nœud intérieur de l'ouverture et les nœuds situés au bord de celle-ci. Dans ces liaisons, la rigidité d'appui du boulon dans la plaque est considérée. Ce maillage est illustré à la figure 1.8.

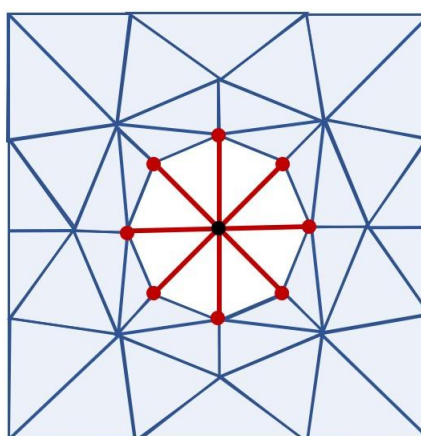


Figure 1.8. Illustration des liaisons (éléments en rouge) qui représentent le comportement de l'appui de la plaque et du boulon.

La rigidité globale exercée par ces huit éléments de liaison (éléments rouges Figure 1.8) est égale à quatre fois la rigidité axiale de chacun de ces éléments (section 10.3.3 dans la

référence [4]). Cela signifie que, quelle que soit la direction de la force appliquée au nœud central commun aux huit éléments, la rigidité apparente sera toujours égale à quatre fois la rigidité axiale d'un élément radial.

Si l'on considère que ces huit éléments travaillent uniquement en compression, comme c'est le cas pour CYPE Connect, la rigidité de chaque rayon, telle que décrite dans la section 10.3.3 dans de la référence [4], serait :

$$k_N = 0,5k \quad (1.8)$$

où k est la rigidité d'appui figurant dans différentes normes.

Dans le cas de l'Eurocode, la rigidité d'appui sera, comme décrit dans le tableau 6.3.2 de l'EN1993-1-8 [12]

$$k = 24n_b k_b k_t d f_u \quad (1.9)$$

En tenant compte de ce qui est décrit dans la section 7.5.1. de la référence [4], la rigidité initiale d'appui peut être considérée comme

$$k = \frac{22,5 t d f_u}{d_{M16}} \quad (1.10)$$

où

- f_u : Contrainte ultime de l'acier sur lequel est appuyé le boulon
- t : Épaisseur du composant sur lequel est appuyé le boulon
- d : Diamètre du boulon
- d_{M16} : Diamètre nominal d'un boulon M16

1.4.4 *Transmission de charges*

Dans CYPE Connect, le modèle d'assemblage boulonné est réalisé en attachant les plaques avec un modèle de boulon dans lequel les charges sont transmises des nœuds de la première plaque à un seul nœud. Ce nœud transmet les charges à un deuxième nœud à travers un élément qui simule le comportement de la tige et ce deuxième nœud transmet ces charges aux nœuds de la deuxième plaque.

Cette façon de transmettre les charges entre les plaques par des connexions nœud à nœud figure dans de nombreux articles scientifiques tels que ceux des références [4], [14], [15], [16], [17] ou [18].

1.5 Contact

Le comportement de contact entre les composants assemblés est réalisé par l'inclusion d'éléments d'attache entre les nœuds qui travaillent uniquement en compression avec une très grande rigidité. Si le maillage n'est pas conforme, les nœuds sont projetés d'une surface à l'autre dans la direction perpendiculaire aux surfaces et les degrés de liberté sont associés au moyen des fonctions de forme des éléments et des Multi Point Constraints. Les nœuds sont attachés avec leurs nœuds projetés correspondants et ces éléments qui ne fonctionnent qu'en compression (figure 1.9) sont inclus avec des rigidités très élevées évitant l'approche entre les deux nœuds.

La modélisation des relations de contact via des connexions nœud à nœud est mentionnée dans de nombreux articles scientifiques tels que ceux des références [15], [19] ou [20].

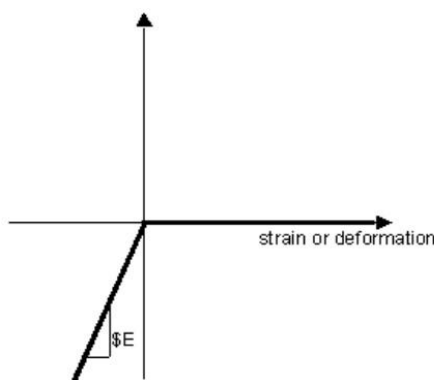


Figure 1.9. Matériau ayant un comportement en compression [21]

1.6 Charges et conditions de contour

1.6.1 Appuis

Un élément de l'assemblage est toujours défini comme « porteur ». Tous les autres éléments y sont attachés.

- **Porteur** : l'élément porteur peut être « continu » ou « non continu » dans l'assemblage. Les éléments « non continus » sont liés extérieurement à une extrémité et les éléments « continus » sont liés extérieurement aux deux extrémités. Les liaisons extérieures saisies contraignent les déplacements et les rotations.
- **Attachés** : les éléments attachés le sont à l'élément porteur et n'ont pas de contraintes externes. Les charges sont appliquées à ces éléments.

1.6.2 Charges

Lorsque la structure est analysée via un modèle de barres, un modèle détaillé des assemblages qui la composent n'est pas réalisé. Si un point d'assemblage est analysé dans un modèle de ce type, la résultante des forces dans cet assemblage est nulle car le modèle est en équilibre.

Afin de concevoir correctement l'assemblage, il est nécessaire de générer un modèle d'attache qui respecte la disposition réelle de l'assemblage en considérant, en outre, les forces exercées aux extrémités des éléments qui le composent, obtenues à partir de la résolution du calcul de la structure.

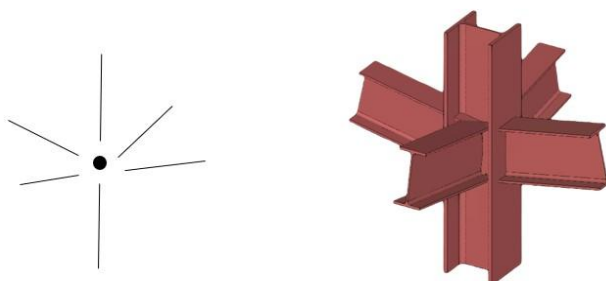
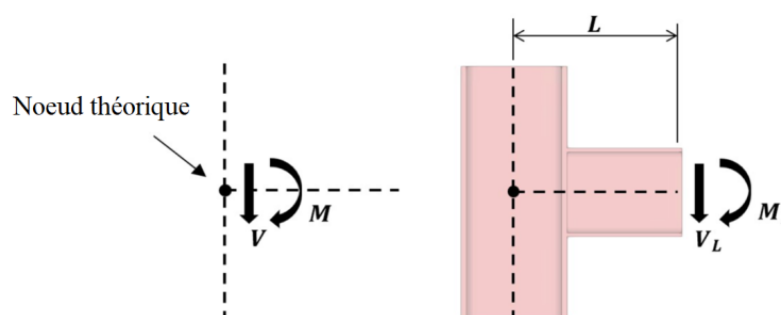


Figure 1.10. Représentation de l'assemblage théorique des éléments et de l'assemblage réel modélisé dans CYPE Connect.

Les forces obtenues dans les éléments de l'analyse structurale sont transmises aux extrémités des éléments. Les excentricités des éléments causées par la conception réelle de l'assemblage sont respectées dans cette transmission des charges aux extrémités. Dans les modèles d'assemblages effectués, une longueur limitée des éléments composant l'assemblage est considérée.

Les effets causés par le modèle précis de l'assemblage sont importants pour la conception de l'attache. Les effets sont illustrés dans la figure 1.11.



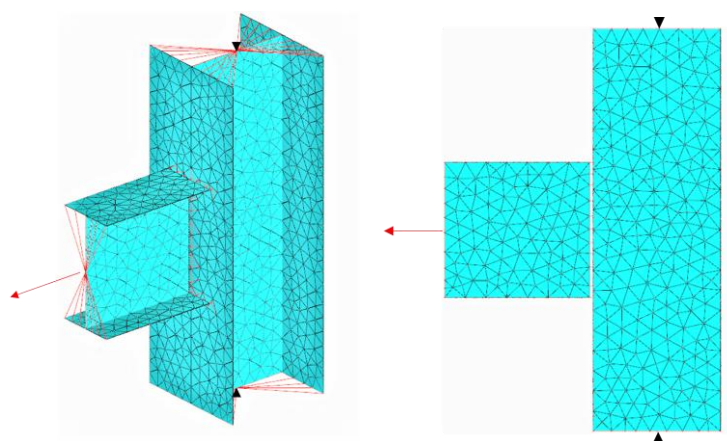
(a) Application des charges au nœud théorique. (b) Application des charges à l'extrémité des éléments.

Figure 1.11. Effets du modèle précis de l'assemblage dans la transmission des charges aux extrémités des éléments.

Lors du calcul de l'assemblage, il faut considérer que les moments et les forces de cisaillement agissant sur le nœud théorique doivent être transférés aux extrémités des éléments de façon à obtenir les charges souhaitées au nœud théorique. Dans l'exemple illustré dans la figure 1.11, une telle transformation de charge serait

$$V_L = V \quad M_L = M - V \cdot L \quad (1.11)$$

Pour modéliser l'application des charges aux extrémités des éléments, le processus décrit dans la section 10.4.1 de la référence [4] est suivi. Des nœuds fictifs situés sur les axes idéaux des éléments seront inclus et ces nœuds seront attachés aux nœuds des extrémités des éléments au moyen d'éléments rigides fictifs. Un exemple de cette modélisation de la charge est illustré dans la figure 1.12.



(a) Vue Générale. (b) Vue Latérale.

Figure 1.12. Modélisation d'éléments rigides factices.

Cette façon de modéliser les charges présente l'avantage de réduire les concentrations de contraintes locales, contrairement aux modèles dans lesquels les charges sont appliquées directement aux nœuds, et l'avantage d'appliquer facilement les charges et les conditions aux limites sur les différents éléments. D'une certaine manière, cette forme de modélisation tient compte de l'hypothèse de Navier ou des sections planes, selon laquelle les sections qui sont planes et perpendiculaires à l'axe de la poutre avant la déformation restent planes et perpendiculaires à l'axe de la poutre après la déformation.

2 Références

- [1] Frank Mckenna, Michael Scott y Gregory Fenves. "Nonlinear Finite-Element Analysis Software Architecture Using Object Composition". En: *Journal of Computing in Civil Engineering J COMPUT CIVIL ENG* 24 (ene. de 2010). DOI: 10.1061 / (ASCE) CP. 1943-5487. 0000002.
- [2] Dassault Systemes. "Abaqus/CAE User's Guide." En: (2014).
- [3] Xinzheng Lu y col. "Development and Application of a High-Performance Triangular Shell Element and an Explicit Algorithm in Opensees for Strongly Nonlinear Analysis". En: *Computer Modeling in Engineering and Sciences* 120 (ene. de 2019), pags. 561-582. DOI: 10.32604/ cmes.2019.04770.
- [4] Paolo Rugarli. *Steel Connection Analysis*. John Wiley and Sons, 2018.
- [5] "Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-5: General rules-Plated structural elements". En: (2006).
- [6] Jean-Luc Fayard y Andre Bignonnet. "Fatigue Design Criterion For Welded Structures". En: *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 19 (jun. de 1996), pags. 723-729.
- [7] M. Bennebach, P. Klein y E. Kirchner. "Several seam weld finite element idealizations challenged in fatigue within a French industrial collaborative workgroup". En: *Procedia Engineering* 213 (2018). 7th International Conference on Fatigue Design, Fatigue Design 2017, 29-30 November 2017, Senlis, France, pags. 403-417. ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.040>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705818302716>.
- [8] Jean Abry y col. "Enhanced fatigue structural stress analysis of a heavy vehicle seam welded steel chassis frame: FEA model preparation, weld model description, fatigue stress calculation and correlation with 10 year operating experience". En: *Procedia Engineering* 213 (2018). 7th International Conference on Fatigue Design, Fatigue Design 2017, 29-30 November 2017, Senlis, France, pags. 539-548. ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.050>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705818302819>.
- [9] Didier Turlier y col. "Seam weld shell element model for thin walled structure FE fatigue design". En: *MATEC Web of Conferences* 165 (ene. de 2018), pag. 21007. DOI: 10.1051/matecconf/ 201816521007.
- [10] Didier Turlier y col. "New FEA shell element model for seam weld static and fatigue structural assessment". En: *Fatigue design* 165 (nov. de 2011). DOI: 10.1051/matecconf/ 201816521007.

- [11] Ying Hu y col. "FE simulation and experimental tests of high-strength structural bolts under tension". En: *Journal of Constructional Steel Research* 126 (2016), pags. 174-186. ISSN: 0143-974X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.021>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16302061>.
- [12] "Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-8: Design of joints". En: (2005).
- [13] ISO 898-1:2013. "Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel, Part 1: Bolts, Screws and Studs with Specified Property Classes, Coarse Thread and Fine Pitch Thread". En: *ISO* (2013).
- [14] S. Xu y X. Deng. "An evaluation of simplified finite element models for spot-welded joints". En: *Finite Elements in Analysis and Design* 40.9 (2004), pags. 1175-1194. ISSN: 0168-874X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2003.08.006>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168874X03001598>.
- [15] Jeong Kim, Joo-Cheol Yoon y Beom-Soo Kang. "Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints". En: *Applied Mathematical Modelling* 31.5 (2007), pags. 895-911. ISSN: 0307-904X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.03.020>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X0600062X>.
- [16] Mohamed El Aghoury, Essam Amoush y Mohamed Soliman. "Numerical Study of Bolted Moment Connections in Cold-Formed Steel Frames". En: *Future Engineering Journal* (2020).
- [17] Alexandra Korolija. "FE-modeling of bolted joints in structures". En: *Master Thesis in Solid Mechanics. Linkopings Universitet* (2012).
- [18] Jun Ye y col. "Efficient design of cold-formed steel bolted-moment connections for earthquake resistant frames". En: *Thin-Walled Structures* 150 (2020). ISSN: 0263-8231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.12.015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382311830942X>.
- [19] "ANSYS. Theory Reference Release 5.6." En: (1999).
- [20] A.M. Habraken y S. Cescotto. "Contact between deformable solids: The fully coupled approach". En: *Mathematical and Computer Modelling* 28.4 (1998). Recent Advances in Contact Mechanics, pags. 153-169. ISSN: 0895-7177. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(98\)00115-0](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(98)00115-0). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717798001150>.
- [21] *Elastic-No Tension Material*. https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Elastic-No_Tension_Material. 2010.