

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 137 (2011)
Heft: 03: Plasticité

Artikel: Vérification automatisée d'assemblages métalliques
Autor: Borges, Luis / Bouron, Sébastien
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-131286>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 18.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Vérification automatisée d'assemblages métalliques

Le projet de transformation du centre de développement et de production de Merck Serono Biotech Center à Corsier-sur-Vevey impliquait notamment la vérification de sécurité structurelle d'un grand nombre d'assemblages métalliques existants. La vérification de ces derniers a été l'occasion de développer, dans une feuille de calcul, une approche qui permet d'automatiser les calculs appliquant les normes actuelles.

Le bâtiment concerné occupe une surface de 40 000 m² et date des années 1990. Les travaux, liés à sa réaffectation et à l'installation de nouveaux bioréacteurs, devaient pouvoir se faire tout en gardant le bâtiment principal en exploitation. Ils passaient par la vérification de toute la structure porteuse du bâtiment existant selon les normes actuelles.



1 200 assemblages à vérifier

Les charges considérées ont dû être adaptées, notamment en y intégrant le poids des nouveaux éléments. Sachant qu'il s'agit d'une structure existante au sens de la nouvelle norme SIA 269 actuellement en consultation, certains facteurs de charge ont pu être réduits, du fait de la certitude concernant les dimensions ou les propriétés des éléments existants (par exemple leur épaisseur ou leur densité). La stabilité et la résistance des éléments de la structure porteuse (y compris ses assemblages) ont dû être revérifiées au sens des nouvelles normes SIA (SIA 26X).

L'équipe chargée d'adapter la charpente métallique à de nouvelles charges a ainsi dû vérifier près de 1200 assemblages rigides boulonnés existants, dont 900 présentaient des combinaisons de paramètres géométriques différentes (épaisseurs de plaque, sections des poteaux et poutres, nombre et type de boulons, raidisseurs, etc.).

Ces assemblages avaient été dimensionnés, il y a 15 ans, avec les méthodes de calcul utilisées à cette époque (tables SZS C9.1 et « calculs à la main » suivant une « méthode rigide plastique réduite »). Pour certaines géométries d'assemblages, les valeurs de la résistance déterminées selon les nouvelles normes ont été considérablement réduites par rapport à celles imposées par les anciennes méthodes de calcul.

L'accès à la majorité des assemblages étant en outre souvent rendu délicat par la présence d'installations techniques compliquées à déplacer, il s'agissait donc de ne procéder à leur renforcement uniquement si celui-ci était jugé absolument nécessaire. Une procédure a été mise en place afin d'optimiser la réponse à cette problématique et minimiser ainsi les interventions et, par suite, leur impact sur la planification du projet.

Le nombre d'assemblages à vérifier imposait une procédure « semi-automatique » permettant d'effectuer le travail dans des délais acceptables, tout en assurant d'un côté la rigueur du « state of the art » des normes et de l'autre côté des idées précises sur les possibilités éventuelles de renforcement des composants critiques.

Fig. 1: Lieu de production Merck/Serono, à Vevey

Fig. 2: Assemblage type «24M27»

Fig. 3a à 3c : Tronçon T-équivalent et ses trois modes de ruine : plastification complète de la semelle (a), rupture des boulons avec plastification de la semelle (b) et rupture des boulons (c) (extrait de [3])

Fig. 4: Schéma d'assemblage avec explication zones comprimée, tendue ou cisaillée (extrait de [3])

Une approche sur mesure

Si de nombreux logiciels pour effectuer des vérifications selon les prescriptions de l'Eurocode 3 (EC3) existent déjà sur le marché, ils ne répondaient malheureusement pas à la plupart des cas rencontrés, notamment ceux liés à l'utilisation de quatre boulons par rangée combinés avec des raidisseurs (fig. 2). De plus, l'entrée des données géométriques et des matériaux dans les logiciels existants limite les possibilités d'automatisation et rendait impossible les 1200 vérifications dans les délais souhaités.

Il a donc été décidé de développer, dans une feuille Excel travaillant de façon semi-automatique, une procédure applicable à tous les assemblages qui devaient être vérifiés. Celle-ci repose sur la méthode proposée par la norme européenne EN1993 partie 1.8 (EC 3), qui permet la caractérisation du comportement en flexion des assemblages. L'évaluation des propriétés mécaniques est faite en termes de rigidité, de résistance et de ductilité. Des procédures analytiques qui permettent une prévision du comportement de l'assemblage y sont fournies. Cette prévision se base sur la connaissance des propriétés mécaniques et géométriques des composants de l'assemblage, selon la méthode des composants [5]¹.

Cette méthode partage les mêmes principes que la SIA 263, mais concrétise les vérifications en proposant des modèles pour investiguer les composants les plus communs. Son modèle introduit le concept de tronçon en T idéalisé pour vérifier les composants selon trois différents modes de ruine (fig. 3a, b & c). Ceci permet l'étude de la résistance et de la rigidité d'un nombre de configurations plus complexe et plus vaste.

La méthode des composants considère chaque assemblage comme un ensemble de composants fondamentaux individuels. La figure 4 illustre les composants retenus pour un assemblage avec une plaque d'extrémité boulonnée soumis à une flexion qui nous sert ici d'exemple. Chacun de ces composants fondamentaux possède sa propre résistance et rigidité, que ce soit en traction, en compression ou en cisaillement.

L'application Excel comprend différents onglets utilisés pour :

- saisir les données de façon tabulaire (y compris les géométries et les efforts sur l'assemblage),
- effectuer le calcul selon l'Eurocode 3,
- accueillir les bases de données des sections de profils, boulons et matériaux,
- établir des rapports contenant les résultats détaillés par assemblage,
- établir des listes de résultats avec résumé des calculs,

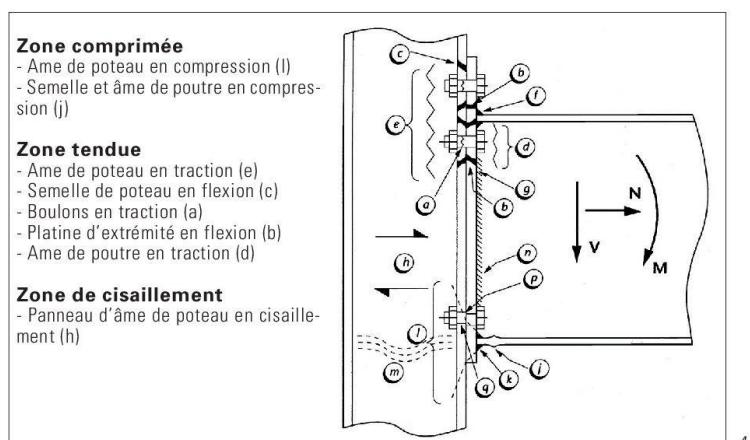
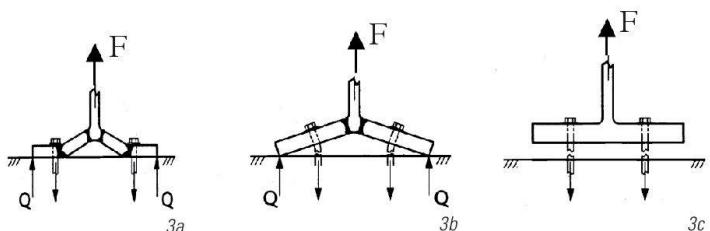
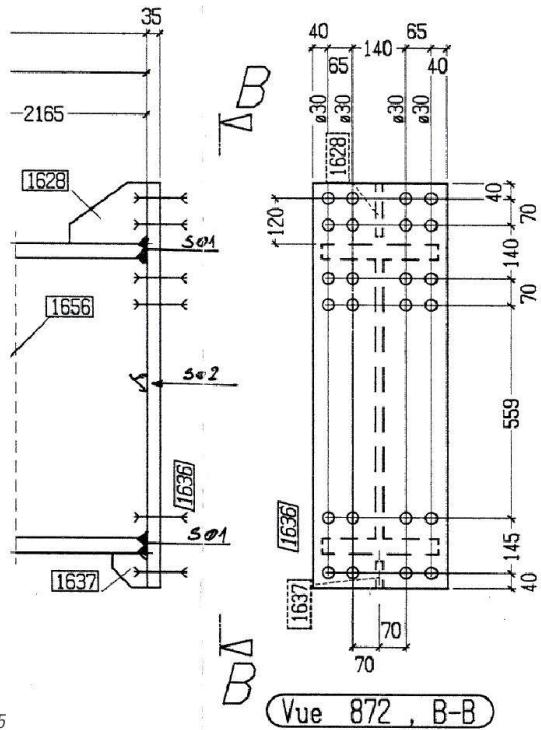
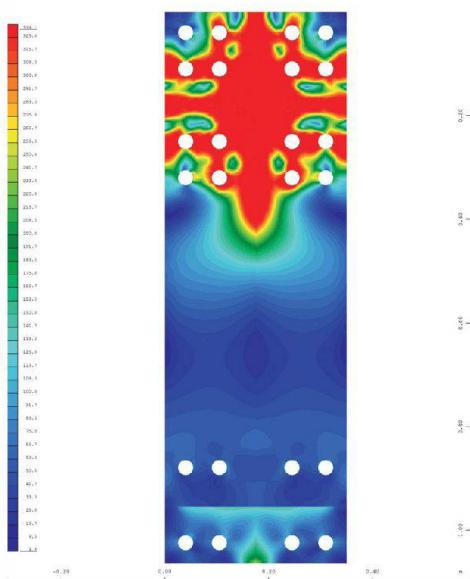


Fig. 5 : Assemblage du type « 24M27 »

Fig. 6 : Zones plastifiées de la platine frontale marquées en rouge (Document Gruner AG)



5



6

- fournir une représentation schématique sur une grille des axes du bâtiment. [1]

La procédure de calcul pour un assemblage comprend généralement:

- l'identification des composants actifs de l'assemblage,
 - l'évaluation selon les normes des caractéristiques de rigidité et de résistance de chaque composant fondamental individuel,
 - le montage de l'assemblage à partir de l'ensemble des composants constitutifs et l'évaluation des caractéristiques de rigidité et de résistance de l'assemblage entier.

La procédure de montage des composants consiste à obtenir les propriétés mécaniques de l'assemblage entier à partir de celles des composants constitutifs individuels. Les forces qui sollicitent l'assemblage sont remplacées par des sollicitations qui agissent sur les composants individuels, ceci en veillant à respecter les conditions d'équilibre. L'application de la méthode des composants repose donc sur une bonne connaissance du comportement des composants fondamentaux.

Il n'existe actuellement pas de recommandations explicites dans l'EC3 pour les assemblages avec des rangées à quatre boulons et une rangée au-dessus de la semelle de la poutre. Pour ce cas particulier, nous avons intégré les recommandations des experts [3], [4], en les interprétant selon la philosophie de l'EC3. En revanche, aucun renseignement n'a pu être trouvé dans la littérature pour les assemblages avec deux rangées au-dessus de la semelle de la poutre (et un raidisseur de plaque), ce qui nous a conduit à émettre, par analogie, les hypothèses suivantes:

- compte tenu de la flexibilité de la plaque, les boulons d'angle ne sont pas pris en compte lors du calcul de la résistance en flexion;
 - les tronçons T idéalisés des composants concernés sont pris en compte selon le schéma de la figure 8a & b.

Validation avec des calculs par éléments finis

Ces hypothèses ont été validées à partir de modèles numériques de calcul par éléments finis avec un détail croissant: tout d'abord avec un modèle à éléments coques (SCIA Engineer2010) pour l'ensemble du nœud et ensuite avec des éléments volumiques pour un détail de l'assemblage (ZSoil). Un troisième modèle, aux éléments coques, a été réalisé sur demande du maître d'ouvrage par un bureau de contrôle et a permis de confirmer les conclusions par une source indépendante ([voir encadré](#)). Notre démarche de vérification des assemblages a en outre été validée dans sa globalité par le Laboratoire de la Construction Métallique (ICOM) de l'EPFL.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

Fig. 7 : Modélisation par éléments finis de l'assemblage « 24M27 » : état déformé avec décollement de la platine frontale (Document Gruner AG)

Fig. 8a et 8b : Hypothèse de comportement admise pour les assemblages avec 4 boulons par rangée et deux rangées au-delà de la semelle supérieure de la poutre (adapté de [1])

Calculs numériques pour un assemblage type

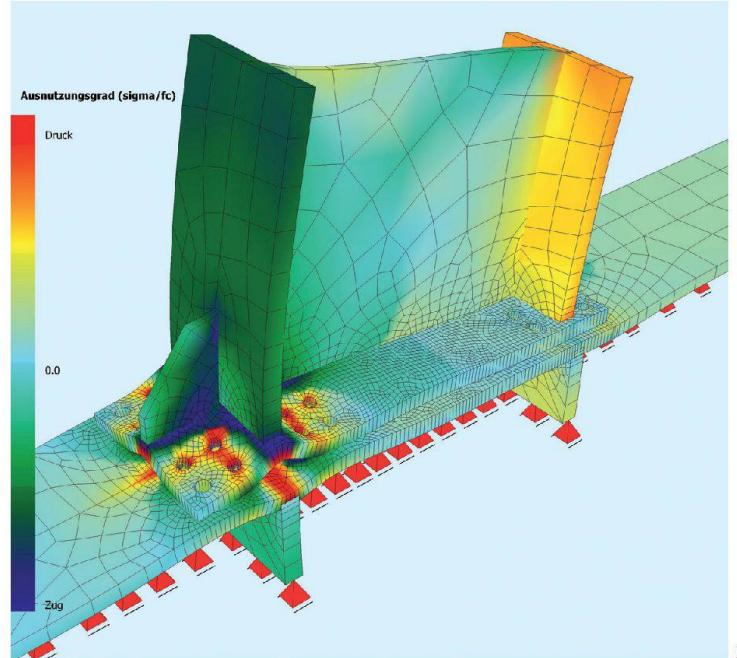
Le maître d'ouvrage souhaitait obtenir une validation indépendante de la méthode de vérification des assemblages mise au point par les ingénieurs de BG, tout en évitant d'avoir à recourir à des tests en laboratoire. Un modèle numérique très avancé a ainsi été élaboré pour l'assemblage type « 24M27 » – l'un des assemblages rattachant une poutre à un poteau par une platine frontale boulonnée (fig. 5).

L'assemblage a été modélisé avec un logiciel (SOFiSTiK 2010) qui utilise des éléments finis de type coques au sein desquels plusieurs couches sont superposées. Ces éléments finis spéciaux permettent de faire varier le comportement du matériau dans l'épaisseur de la section considérée et d'analyser les résultats séparément pour chaque couche. Il est ainsi possible, en étudiant la variation des contraintes dans l'épaisseur, de distinguer les zones qui restent en deçà de la limite élastique de celles qui atteignent le stade plastique. Les réserves plastiques de l'acier peuvent ainsi être exploitées de manière très réaliste. Afin de profiter aussi de leurs réserves plastiques, les boulons ont quant à eux été modélisés par ressorts non linéaires. Dans les zones soumises à pression, le contact entre la platine de la poutre et l'aile du poteau est caractérisé par un déplacement nul des parties adjacentes.

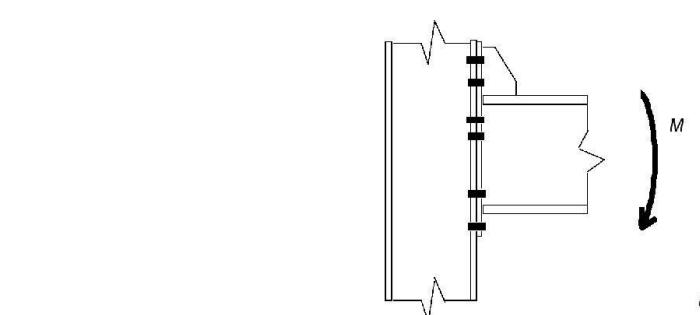
L'assemblage est calculé itérativement en augmentant par palier la charge sur le système. Le logiciel effectue une détermination non linéaire des contraintes et déformations et intègre une redistribution des contraintes dans les zones pas encore plastifiées. La charge est accrue jusqu'à ce que l'élongation plastique maximale (juste avant la rupture) soit atteinte en un point du système. A partir d'un certain palier de charge, les déformations du système – en particulier la rotation de l'assemblage due au décollement entre la platine frontale et l'aile du poteau – augmentent de façon exponentielle jusqu'à la rupture. Avant ce palier, les déformations se comportent de façon quasiment linéaire : la charge finale théoriquement applicable sur l'assemblage est déterminée par ce palier de charge, qui se caractérise par un décollement acceptable de la platine frontale (fig. 7).

La plastification de la platine frontale et celle des boulons dans le secteur de l'aile tendue s'avèrent décisives (fig. 6). Le comportement de l'assemblage reste similaire aux différents calculs comparatifs et confirme notamment la quasi non-participation des boulons situés dans les angles extérieurs.

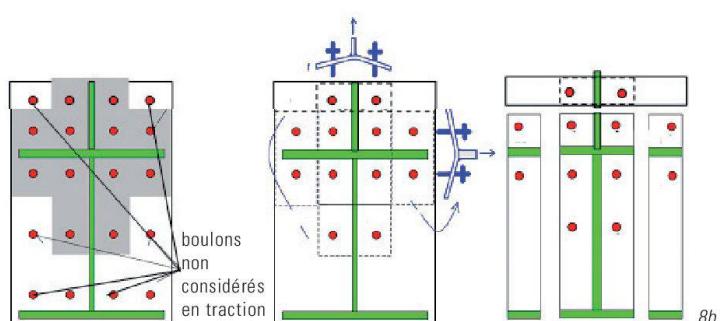
Pascal Lequime, ing. civil dipl. Université de Karlsruhe
Gruner AG Ingenieure und Planer
Gellerstrasse 55, CH – 4020 Basel



7



8a



8b

Parmi les assemblages vérifiés, le type « 24M27 » a été choisi à cause de sa typologie particulière – 24 boulons M27, dont 16 placés en quatre rangés doublement symétriques de part et d'autre de l'aile supérieure et du raidisseur et âme de la poutre. La modélisation d'un quart de ce détail avec des éléments finis volumiques a permis de valider les hypothèses assumées et décrites en haut. Le comportement de l'assemblage modélisé est similaire aux principes retenus par l'EC3 (notamment le comportement des tronçons équivalents et la non-participation des boulons d'angle).

La plastification de la plaque dans le secteur de l'aile tendue et celle des boulons tendus intérieurs (zones jaunes et rou-

Fig. 9 : Modélisation par éléments finis d'un quart de la partie tendue de l'assemblage 24M27 à l'état déformé pour une charge correspondante à 3 000 kNm (FEM ZSoil).

(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs, droits réservés.)

ges sur la figure 9) s'avèrent déterminantes pour atteindre la résistance ultime de ce type d'assemblages. Qualitativement, le comportement de l'assemblage confirme la quasi non-participation des boulons d'angle extérieurs pour ce qui concerne la résistance à la flexion.

La valeur de la résistance de calcul obtenue par éléments finis pour les différentes géométries d'assemblage se situe dans un ordre de grandeur similaire à celle obtenue à l'aide de la méthode présentée plus haut. La convergence des résultats des éléments finis a permis, d'une part, de pouvoir raisonnablement renoncer à un test en laboratoire important et coûteux pour valider les hypothèses et, de l'autre, d'étendre la méthode des composants à des cas géométriques non-standard.

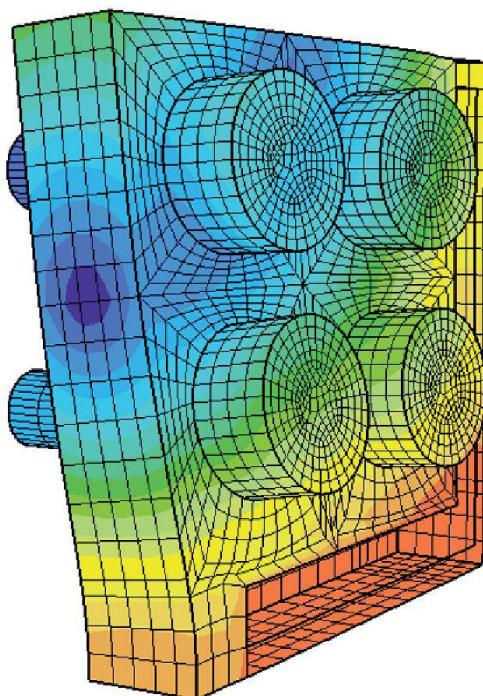
Extension pour une généralisation

Entièrement intégrée dans une feuille de calcul Excel, la méthode semi-automatique présentée peut être appliquée pour la vérification de tous les types d'assemblages boulonnés avec plaque frontale. Dans le cas du chantier de Serono,

son utilisation a permis de vérifier la totalité des assemblages et de cibler les renforcements en un temps record. Cette procédure se traduit évidemment non seulement par un bénéfice considérable en matière de planning pour la vérification, mais aussi par une forte réduction du nombre et donc du prix des interventions, puisque celles-ci n'ont concerné que moins de 5 % des assemblages.

Une extension de l'application pour la conception et le dimensionnement d'assemblages est actuellement en cours de développement [2]. A noter enfin que les travaux décrits dans cet article soulignent l'importance de la mise à jour en cours de la table Szs C9.1, qui doit notamment faciliter un pré-dimensionnement rapide dans le respect des normes actuelles (Eurocode 3 et SIA 263).

Luis Borges, ing. civil, MSc, dr EPFL
Sébastien Bouron, ing. civil, CEng, MICE
BG Ingénieurs Conseils SA
Av. de Cour 61, CH – 1001 Lausanne



9

Références :

- [1] L. BORGES, M. THOMANN, S. BOURON, *Advanced Steel Moment Connection Calculation using MS Excel and the Eurocode 3 Component Method*, CST2010, Valencia
- [2] L. BORGES, M. THOMANN, S. BOURON, *Steel connection optimizer using MSEExcel and Genetic Algorithms*, Eurosteel 2011, Budapest
- [3] *Joints in Steel Construction Moment Connections*, Steel Construction Institute, 1995, Steel Construction Institute (Great Britain)
- [4] L. SIMÕES DA SILVA, A. SANTIAGO (eds), *Manual de ligações metálicas*, CESTRUÇO Project, «Continuing Education in Structural Connections», Coimbra, 2003
- [5] HIRT, M.A., CRISINEL, M., *Charpentes métalliques : Conception et dimensionnement des halles et bâtiments*, Traité de Génie Civil 11, 2^{ème} édition, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2005