



# PythonX<sup>®</sup>

A Lincoln Electric Company

## LE GUIDE PYTHONX<sup>®</sup> DU DÉCOUPAGE PLASMA EN CODES ET NORMES

**LINCOLN<sup>®</sup>**  
**ELECTRIC**



## Table des matières

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| Politique d'assistance à la clientèle .....     | 5  |
| Mises à jour du document.....                   | 5  |
| Le But et utilisation de ce Guide.....          | 5  |
| Système PythonX.....                            | 7  |
| Découpage à l'arc plasma.....                   | 9  |
| Codes et normes .....                           | 9  |
| États-Unis d'Amérique .....                     | 10 |
| Canada .....                                    | 11 |
| Europe .....                                    | 12 |
| Australie et Nouvelle-Zélande .....             | 13 |
| Japon .....                                     | 13 |
| Types de chargements .....                      | 14 |
| Chargement statique .....                       | 14 |
| Chargement cyclique .....                       | 15 |
| Chargement sismique.....                        | 15 |
| Chargement d'impact .....                       | 15 |
| JointS boulonnés .....                          | 16 |
| JointS bien serrés .....                        | 17 |
| JointS précontraints .....                      | 17 |
| JointS antiglisement .....                      | 18 |
| Trous de boulons .....                          | 19 |
| Trous de boulons standard (STD) .....           | 19 |
| Trous de boulons surdimensionnés (OVS) .....    | 19 |
| Trous de boulons à fente courte et longue ..... | 19 |
| Trous de boulons découpés au plasma .....       | 20 |
| Normes américaines .....                        | 21 |
| Normes canadiennes .....                        | 24 |
| Normes européennes .....                        | 25 |
| Normes australiennes et néo-zélandaises.....    | 25 |
| Normes japonaises .....                         | 26 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Bords découpés au plasma.....                                         | 27 |
| Bords libres .....                                                    | 27 |
| Normes américaines .....                                              | 28 |
| Normes canadiennes .....                                              | 28 |
| Normes européennes .....                                              | 29 |
| Normes australiennes et néo-zélandaises .....                         | 30 |
| Normes japonaises .....                                               | 31 |
| Pénétrations de bande et coins rentrants .....                        | 31 |
| Normes américaines .....                                              | 32 |
| Normes canadiennes .....                                              | 33 |
| Normes européennes .....                                              | 33 |
| Normes australiennes et néo-zélandaises .....                         | 33 |
| Normes japonaises .....                                               | 33 |
| Chapes de poutre .....                                                | 33 |
| Normes américaines .....                                              | 35 |
| Normes canadiennes .....                                              | 36 |
| Normes européennes .....                                              | 36 |
| Normes australiennes et néo-zélandaises .....                         | 37 |
| Normes japonaises .....                                               | 37 |
| Trous d'accès aux soudures .....                                      | 37 |
| Normes américaines .....                                              | 37 |
| Normes canadiennes .....                                              | 41 |
| Normes européennes .....                                              | 43 |
| Normes australiennes et néo-zélandaises .....                         | 43 |
| Normes japonaises .....                                               | 43 |
| Couper des sections de poutre réduites .....                          | 43 |
| Fatigue et découpage plasma.....                                      | 45 |
| American Institute of Steel Construction .....                        | 45 |
| Bords découpés thermiquement .....                                    | 45 |
| Coins rentrants, trous d'accès aux soudures et chapes de poutre ..... | 46 |
| Trous de boulons.....                                                 | 47 |
| Canada .....                                                          | 48 |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Bords découpés thermiquement.....                                                | 48 |
| Trous de boulons.....                                                            | 49 |
| Europe .....                                                                     | 49 |
| Bords découpés thermiquement.....                                                | 49 |
| Trous de boulons.....                                                            | 51 |
| Australie/Nouvelle-Zélande .....                                                 | 53 |
| Bords découpés thermiquement.....                                                | 53 |
| Trous de boulons.....                                                            | 54 |
| Marquage plasma .....                                                            | 55 |
| Critères de qualité pour les surfaces découpées au plasma .....                  | 59 |
| Rugosité de surface .....                                                        | 59 |
| Outils de mesure de la rugosité de surface.....                                  | 61 |
| Australie/Nouvelle-Zélande Mesure de la rugosité<br>de la surface coupée.....    | 62 |
| Instruments de mesure de la rugosité de surface/profil<br>de type à contact..... | 63 |
| Normes et bibliographie citées.....                                              | 65 |
| Résumé et avertissement.....                                                     | 67 |

## Politique d'assistance à la clientèle

La Lincoln Electric Company vend des consommables de découpage et de soudage et du matériel connexe. À l'occasion, les acheteurs peuvent demander à la Société des conseils ou des informations sur l'utilisation de ces produits. Par courtoisie pour nos clients, nos employés répondent gratuitement à leurs questions sur la base des informations fournies et de leur connaissance des produits Lincoln Electric. Lincoln Electric n'offre aucune garantie et n'assume aucune responsabilité quant à ces informations ou conseils. Nous n'assumons aucune responsabilité quant à la mise à jour ou la correction de ces informations ou conseils une fois qu'ils ont été donnés. De même, ces informations et ces conseils ne créent, n'élargissent ni ne modifient aucune garantie en ce qui concerne la vente des produits de la Société. Lincoln Electric décline expressément toute garantie de toute nature, y compris toute garantie d'aptitude particulière, à l'égard de ces informations ou conseils. La sélection et l'utilisation de produits spécifiques vendus par Lincoln Electric se font sous le seul contrôle et reste la seule responsabilité du client.

## Mises à jour du document

Les informations contenues dans ce document sont considérées comme exactes au moment de l'impression et sont sujettes à modification à mesure que des informations et des données supplémentaires deviennent disponibles. Des exemples de telles modifications incluent, sans toutefois s'y limiter, l'incorporation de données de produit supplémentaires et les modifications dues aux mises à jour des normes. L'utilisateur de ce guide est invité à consulter le site Web de Lincoln Electric pour les mises à jour ([www.lincolnelectric.com](http://www.lincolnelectric.com)). Ce guide fait référence à d'autres documents non publiés par Lincoln Electric. Ces documents sont également sujets à modification et l'utilisateur de ce guide est invité à vérifier si la dernière édition des documents référencés présente des modifications susceptibles d'affecter le contenu de ce guide.

## Le but et l'utilisation de ce guide

Ce guide traitera des problèmes techniques relatifs aux trois fonctionnalités associées aux pièces traitées par les systèmes PythonX, à savoir :

- ▶ Trous découpés thermiquement qui feront partie d'assemblages boulonnés
- ▶ Surfaces découpées thermiquement autres que les trous de boulons, telles que les bords des éléments, les pénétrations de la bande, les chapes de poutre, les trous d'accès aux soudures et les rebords de section de poutre réduits
- ▶ Marquages pour les emplacements de montage, symboles de soudure et marques de pièces permanentes

Le Tableau 1 est destiné à servir de guide de référence rapide pour déterminer l'autorisation ou l'interdiction du découpage plasma pour une application particulière et pour diriger l'utilisateur de ce guide vers les sections correspondantes du guide contenant les informations appropriées. Le tableau et ce Guide ne doivent pas être utilisés seuls sans consulter les codes et normes relatifs aux exigences codifiées.

| TABLEAU 1. AUTORISATION DES TROUS DE BOULONS ET DES BORDS LIBRES COUPÉS AU PLASMA, ET MARQUAGE DES ÉLÉMENTS |                                               |                                  |        |                                        |                                  |                                        |                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|--------|----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| Application                                                                                                 | Chargement                                    | É.-U.                            | Canada | Europe                                 | Japon                            | Australie                              | Nouvelle Zélande                       |
| Trous de boulons                                                                                            | Statique                                      | Oui                              | Oui    | Oui                                    | Selon l'application <sup>1</sup> | Oui                                    | Oui                                    |
|                                                                                                             | Cyclique                                      | Selon l'application <sup>2</sup> | Oui    | Oui                                    | Non                              | Oui                                    | Oui                                    |
|                                                                                                             | Sismique                                      | Selon l'application <sup>3</sup> | Non    | Les codes ne traitent pas <sup>4</sup> | Non                              | Les codes ne traitent pas <sup>4</sup> | Les codes ne traitent pas <sup>4</sup> |
|                                                                                                             | Voir pages 19-26                              |                                  |        |                                        |                                  |                                        |                                        |
| Bords libres                                                                                                | Statique                                      | Oui                              | Oui    | Oui                                    | Selon l'application <sup>1</sup> | Oui                                    | Oui                                    |
|                                                                                                             | Cyclique                                      | Oui                              | Oui    | Selon l'application <sup>1</sup>       | Selon l'application <sup>1</sup> | Oui                                    | Oui                                    |
|                                                                                                             | Sismique                                      | Oui                              | Oui    | Les codes ne traitent pas <sup>4</sup> | Selon l'application <sup>1</sup> | Les codes ne traitent pas <sup>4</sup> | Les codes ne traitent pas <sup>4</sup> |
|                                                                                                             | Voir pages 26-53                              |                                  |        |                                        |                                  |                                        |                                        |
| Marquages plasma                                                                                            | Les codes ne traitent pas<br>Voir pages 53-58 |                                  |        |                                        |                                  |                                        |                                        |

Remarques 1. Voir le texte applicable.

2. RCSC 2014 et AISC 360-16 diffèrent légèrement en ce qui concerne les exigences, et l'Annexe 3 AISC 360-16 contient des restrictions de trous en fonction du type d'assemblage boulonné.

3. AISC 358-16 contient des exigences pour plusieurs types d'assemblages à moment ; l'acceptabilité des trous coupés au plasma dépend de l'assemblage. Voir pages 22-23 de ce Guide.

4. Les normes européennes, australiennes et néo-zélandaises ne traitent pas spécifiquement de cette application. L'utilisateur de ce guide est invité à consulter l'ingénieur responsable du projet ou autre responsable technique du projet pour obtenir des conseils.

Le système PythonX est populaire pour la fabrication d'éléments en acier destinés à la construction, généralement régis par les codes du bâtiment. Ainsi, pour de nombreuses applications PythonX, des exigences réglementaires s'appliqueront. Dans certains cas, l'utilisation du découpage plasma pour

les trous de boulons, les bords libres ou le marquage a été restreinte par des exigences réglementaires applicables. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces restrictions. Les codes et les normes peuvent empêcher intentionnellement l'utilisation du processus en raison d'un problème de performances de l'assemblage connu. Dans d'autres situations, les exigences peuvent ne pas être à jour. Une situation fréquente est celle où les codes autorisent l'utilisation du découpage plasma, mais les normes sont mal comprises et le processus est inopportunément rejeté. Ce Guide fournit des informations sur les cas où le découpage et le marquage à l'arc plasma sont autorisés ou interdits et les cas où les codes et les normes sont muets sur le sujet.

Dans certains cas, les normes réglementaires utilisent le terme « oxycoupage » au lieu du terme plus général « découpage thermique ». Le terme « découpage thermique », contrairement au terme « oxycoupage », inclut le découpage plasma. Dans de nombreux cas, et peut-être même dans la plupart des cas, l'utilisation du terme plus restrictif « oxycoupage » n'a pas été choisie pour exclure la coupe au plasma, mais plutôt pour identifier la technologie plus ancienne qui était utilisée avant le découpage plasma.

Lorsque les exigences relatives à l'utilisation du découpage plasma ne sont pas comprises, lorsque des normes plus anciennes sont spécifiées pour un projet ou lorsque les normes ne traitent pas directement de l'utilisation du découpage plasma, l'ingénieur responsable ou toute autre autorité technique supervisant un projet doit décider d'autoriser ou de refuser le processus. Lorsque les normes en vigueur ne mentionnent pas l'utilisation du découpage plasma, l'approche utilisée par d'autres normes (comme indiqué dans ce Guide) peut aider l'autorité à prendre la décision concernant la pertinence du procédé. Par conséquent, l'utilisateur de ce Guide est encouragé à présenter les informations fournies dans ce Guide à l'instance ou aux instances dirigeantes compétentes pour examen et acceptation du découpage plasma, le cas échéant.

Pour certaines applications où le système PythonX pourrait être utilisé, le travail n'est pas régi par des codes ou des normes réglementaires. Pour ces applications, les informations contenues dans ce Guide aideront l'autorité technique à évaluer si la découpe thermique de trous et de bords, ainsi que des marquages thermiques, sont adéquats pour les applications non réglementées.

## Système PythonX

Le système PythonX est une machine pratique et économique pour le découpage plasma de trous de boulons, de pénétrations de bandes, de traverses de poutres, de trous d'accès aux soudures et de toute autre modification de découpage effectuée thermiquement aux formes laminées et aux éléments assemblés. De plus, le PythonX peut être utilisé pour tracer des marques d'identification ou des lettres sur la surface de l'acier. Le système est utilisé pour produire des composants utilisés dans les structures de bâtiments, ainsi que d'autres éléments de structures utilisés pour diverses fabrications en acier.

Le découpage plasma permet de séparer la plupart des matériaux de structure, y compris les tôles en acier au carbone et faiblement alliées d'une épaisseur maximale de 50 mm (2 po), avec des coupes de haute qualité. Le découpage plasma offre un bon équilibre en termes de coûts en capital, ainsi qu'une excellente qualité de coupe, des vitesses de coupe élevées, une productivité supérieure et des coûts d'exploitation faibles par rapport aux autres méthodes de coupe.

Les éléments produits par un PythonX sont généralement soudés ou boulonnés à d'autres éléments ; dans certains cas, les soudures et les boulons sont utilisés ensemble. La plupart des découpages thermiques effectués par le PythonX deviennent partie intégrante d'un assemblage structurel. L'intégrité de telles coupes peut affecter les performances de l'assemblage en service.

L'un des nombreux avantages du système PythonX est la constance avec laquelle des coupes thermiques peuvent être effectuées par rapport à l'alternative courante : la découpe manuelle à la torche. Les tailles et dimensions spécifiques requises ou préférées de certaines configurations géométriques, telles que les trous d'accès aux soudures, peuvent être programmées et coupées automatiquement et de manière constante. Les coûts de fabrication peuvent être réduits et la qualité améliorée lorsqu'un système de découpe PythonX est utilisé.

Le système PythonX est capable de découper des trous de boulons ronds et oblongs. Les trous oblongs permettent une plus grande souplesse d'alignement lorsque les joints boulonnés sont assemblés, mais l'utilisation de fentes oblongues est interdite dans certaines situations.

Le système PythonX utilise le découpage plasma pour percer des trous et découper des surfaces. Comme pour tous les procédés de découpage thermique, le découpage plasma crée une zone affectée par la chaleur (ZAT) adjacente à la découpe et induit des contraintes résiduelles (ce qui se produit également avec la plupart des procédés de découpe thermique et de soudage). En outre, il existe une rugosité de surface associée aux surfaces découpées thermiquement. Dans la plupart des conditions de charge et lorsqu'elles sont intégrées à la plupart des assemblages boulonnés et soudés, ces caractéristiques ne sont pas préjudiciables.

Cependant, dans le cas de certaines combinaisons de chargement et de certains types d'assemblages boulonnés, ces caractéristiques peuvent entraîner des problèmes de performances. De même, des restrictions sont appliquées aux trous produits mécaniquement dans certains types d'assemblages boulonnés et dans certaines conditions de charge. Les trous perforés sont parfois interdits par les codes de la construction ; dans ce cas, des trous percés ou des trous poinçonnés et alésés peuvent être nécessaires. Ainsi, les restrictions sur les moyens de fabrication des trous pour certains assemblages boulonnés et types de chargements ne sont pas limitées aux surfaces découpées thermiquement.



## Découpage à l'arc plasma

La découpe à l'arc plasma est un procédé de découpe à l'arc thermique qui fournit une méthode efficace de séparation du matériau. Le découpage plasma offre des avantages majeurs par rapport à l'oxycoupage, en termes de productivité, de rapidité et de coût, ainsi qu'une qualité de surface de coupe supérieure, des propriétés mécaniques améliorées et un respect accru des tolérances requises. Le processus est défini comme « un processus de découpage à l'arc utilisant un arc resserré et éliminant le métal en fusion avec un jet à grande vitesse de gaz ionisé sortant de l'orifice constrictif » (AWS A3.0, 2010).

La formation d'un arc au plasma commence lorsqu'un gaz tel que l'oxygène, l'azote, l'argon ou même l'air comprimé d'atelier est forcé à travers un petit orifice de buse à l'intérieur de la torche. Un arc électrique généré par l'alimentation externe est ensuite introduit dans ce flux de gaz sous haute pression, ce qui donne ce que l'on appelle communément un « jet de plasma ». Le jet de plasma atteint immédiatement des températures de 22 000 °C [40 000 °F], perçant rapidement à travers la pièce et soufflant le matériau fondu.

Avec des niveaux réduits d'énergie thermique provenant de la torche à plasma, il est possible de marquer ou de graver la surface de l'acier ; ces marquages sont appelés marquages plasma.

## Codes et normes

Les codes et les normes régissent la fabrication et la construction de bâtiments, de ponts et d'autres structures en acier dans le monde entier. Ces documents, élaborés par différents comités, sont basés sur des pratiques et expériences mondiales et locales. Les codes ou les normes peuvent être spécifiques à une certaine condition de chargement, par ex. des charges sismiques, ou ils peuvent régir les pratiques générales de fabrication.

Chaque norme majeure de construction en acier autorise l'utilisation du découpage au plasma pour certaines tâches de découpage, si ce n'est pour toutes les tâches, lors de la fabrication de l'acier de construction. Ces tâches comprennent :

- ▶ faire des trous pour des assemblages boulonnés
- ▶ faire des trous pour les tiges d'ancrage et autres ancrages
- ▶ la découpe de bords des éléments et des composants, y compris le rognage de bords cisailés et laminés
- ▶ la découpe pour la préparation de rainures de joints soudés
- ▶ la découpe de détails spécifiques, tels que des trous d'accès aux soudures et des traverses de poutres
- ▶ la découpe de pénétrations des éléments

- ▶ la découpe de brides pour les assemblages de section de poutre réduite (un type d'assemblage à moment sismique)

Les applications et les limitations, ainsi que les exigences de qualité, varient selon les normes de construction. L'utilisateur de ce Guide est invité à passer en revue les normes applicables et à identifier les exigences spécifiques, car il ne fournit que des résumés des normes. De même, les versions plus récentes des normes citées peuvent modifier les exigences décrites dans ce Guide. En règle générale, les dernières versions des normes refléteront les dernières avancées technologiques et les dernières recherches.

Lorsque des normes plus anciennes sont spécifiées pour un projet ou lorsque les normes applicables ne traitent pas directement de l'utilisation du découpage plasma, l'utilisateur de ce Guide est encouragé à présenter les informations fournies à l'organe ou aux organes responsable(s) approprié(s) ou compétent(s) pour qu'il(s) accepte(nt) le découpage au plasma pour l'application ou le projet particulier et pour la révision future de la ou des normes applicables.

Vous trouverez ci-dessous une brève explication d'un certain nombre de codes et normes s'appliquant au découpage et au marquage plasma dans un pays donné.

## États-Unis d'Amérique

L'American Institute of Steel Construction (AISC) publie plusieurs normes concernant des catégories spécifiques de constructions en acier. La norme principale pour les bâtiments à structure en acier et les autres structures est la *Specification for Structural Steel Buildings*, portant le libellé AISC 360. Au moment de la publication de ce Guide, la dernière édition de AISC 360 correspond à l'édition 2016 et porte le libellé AISC 360-16.

Pour les systèmes de construction en acier et composites en acier/béton armé spécialement conçus pour la résistance sismique, les exigences du *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, publiées en 2016 et portant le libellé AISC 341-16, s'applique en plus de AISC 360-16. AISC 341 ajoute et modifie les exigences de AISC 360 ; si aucun écart par rapport à AISC 360 n'est répertorié dans AISC 341, les exigences de AISC 360 sont applicables.

Une norme supplémentaire, *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*, publiée en 2016 et portant le libellé AISC 358-16, spécifie les critères de conception, de détail, de fabrication et de qualité pour les assemblages à moment préqualifiés conformément à AISC 341-16.

Une quatrième norme AISC est la *Specification for Safety-Related Steel Structures for Nuclear Facilities*, qui traite de la conception, de la fabrication et du montage de structures en acier dans le cadre de la sécurité des installations nucléaires et complète AISC 360. La version actuelle a été publiée en 2012 sous le libellé AISC N690-12, avec un supplément ajouté en 2015, portant le libellé AISC N690s1-15.

Les normes AISC susmentionnées peuvent être téléchargées gratuitement sur le site web de l'AISC : [www.aisc.org](http://www.aisc.org).

Les normes AISC font référence aux normes de l'American Welding Society (AWS) pour la plupart des exigences de soudage et de découpage. Pour la construction, AISC 360-16 fait référence à AWS D1.1/D1.1M *Structural Welding Code – Steel*, publié en 2015 et portant le libellé AWS D1.1 / D1.1M:2015.

Pour les structures détaillées concernant la résistance sismique, AISC 341-16 fait référence à AWS D1.8/D1.8M *Structural Welding Code – Seismic Supplement* qui ajoute et modifie les exigences de AWS D1.1/D1.1M:2015. La version la plus récente est AWS D1.8 / D1.8M:2016.

Les normes AISC font référence à la norme RCSC (Research Council on Structural Connections) pour les exigences d'installation et d'inspection pour la plupart des boulonnages de structures. Cette norme est la *Spécification pour les joints de charpente utilisant des boulons à haute résistance*. AISC 360-16 fait référence à l'édition 2014 et est communément appelée la *spécification RCSC 2014*. Un erratum à cette norme a été publié en avril 2015, mais il n'a apporté aucune modification aux critères de trou de boulon.

Les ponts routiers sont généralement conçus et construits conformément aux normes de l'AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) qui font référence au AASHTO/AWS D1.5/D1.5M *Bridge Welding Code* concernant les exigences de soudage et de découpage. Les ponts de chemin de fer sont généralement régis par les spécifications de l'AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association) qui font référence à AASHTO/AWS D1.5/D1.5M, en modifiant certains articles. Outre ces normes nationales, certains États ou chemins de fer peuvent imposer des exigences supplémentaires aux ponts.

## Canada

L'Institut canadien de la construction en acier (ICCA) ne publie pas directement une norme équivalente à AISC 360. La norme *Conception des structures en acier* est plutôt publiée en tant que norme de l'Association canadienne de normalisation (ACNOR), sous le nom de CSA S16, avec la participation active de l'ICCA. Au moment de l'élaboration de ce Guide, la version la plus récente, publiée en 2014, est connue sous le nom de CSA S16-14. Le L'ICCA publie le *Commentaire de l'ICCA sur la norme CSA S16-14*, qui est inclus dans la 11e édition du *Handbook of Steel Construction*, publié en 2016.



CSA 16 fait référence à *Constructions soudées en acier (soudage à l'arc)*, publié en 2013 et portant le libellé CSA W59-13, concernant la plupart des exigences liées au soudage et au découpage. Cependant, une nouvelle version de CSA W59 a été publiée en 2018, *Constructions soudées en acier CSA W59-18*, et est utilisée aux fins de ce Guide. La prochaine version de la norme CSA S16, qui paraîtra en 2019, fera référence à la norme CSA W59-18.

Contrairement à AISC 360-16, la norme CSA S16 ne fait pas référence à la spécification RCSC pour les exigences de boulonnage.

## Europe

La conception des structures en Europe est régie par une série de normes européennes (EN), appelées Eurocodes, développées par le CEN (Comité européen de normalisation). Les normes concernant les structures en acier sont :

- ▶ EN 1990, *Base de conception structurale*
- ▶ EN 1991, *Eurocode 1 : Actions sur les structures*
- ▶ EN 1993, *Eurocode 3 : Conception des structures en acier*
- ▶ EN 1994, *Eurocode 4 : Conception des structures composites en acier et en béton*
- ▶ EN 1998, *Eurocode 8 : Conception des structures pour leur résistance aux séismes*

Au sein de Eurocode 3, la partie 1.8, portant le libellé EN 1993-1-8, *Conception des joints*, concerne la conception des joints boulonnés et soudés entre les éléments de structure.

Une annexe nationale (NA) à une norme européenne peut être adoptée par un pays européen donné, lorsque l'autorisation est donnée pour une NA dans le corps de l'Eurocode. celle-ci sert souvent à spécifier ou à modifier des valeurs de conception ou une équation, à exiger une méthode de conception spécifique, ou à traiter de l'utilisation d'une annexe informative ou normative.

Aucun des documents précédemment énumérés ne traite directement de problèmes de fabrication tels que le découpage et le perçage (fabrication de trous pour les boulons), mais font plutôt référence à EN 1090-2 *Exécution des structures en acier et des structures en aluminium - Partie 2 : Exigences techniques pour les structures en acier*, une norme distincte développée par CEN/TC 135, *Exécution des structures en acier et des structures en aluminium*. Cette norme traite des exigences spécifiques relatives à la réalisation de structures en acier pour les bâtiments et les travaux de génie civil, y compris les règles de gestion de la qualité, les matériaux, la fabrication, le montage et le contrôle, ainsi que les exigences spécifiques relatives au découpage, au soudage et au boulonnage. Cette norme a été mise à jour et publiée en 2018 (EN 1090-2:2018).

## Australie et Nouvelle-Zélande

L'Australie et la Nouvelle-Zélande partagent plusieurs normes communes, mais la Nouvelle-Zélande utilise ses propres normes s'agissant de la conception et de la construction parasismiques. Les normes sont gérées et publiées par Standards Australia (AS) et Standards New Zealand (NZS), selon le cas. L'Australian Steel Institute (ASI), Weld Australia (WA), anciennement connu sous le nom de Welding Technology Institute of Australia (WTIA), Steel Construction New Zealand (SCNZ) et Heavy Engineering Research Association (HERA) de la Nouvelle-Zélande jouent un rôle déterminant dans le développement de normes AS/NZS relatives à la construction en acier, au soudage et au découpage.

Pour la conception de structures en acier, l'Australie utilise AS 4100-1998 (R2016) *Steel structures*. Adoptée à l'origine en 1998, un supplément y a été ajouté en 1999 et elle a été réaffirmée en 2016. En Nouvelle-Zélande, on utilise NZS 3404.1: *Steel Structures Standard* (2007). La version actuelle de cette norme est la version 2007, avec deux modifications ultérieures.

L'Australie et la Nouvelle-Zélande utilisent toutes les deux AS/NZS 5131:2016, *Structural Steel Work—Fabrication and Erection*. Cette norme est basée sur la plupart des sujets principaux de la EN 1090-2 *Execution of Steel Structures and Aluminium Structures, Part 2: Technical Requirements for Steel Structures*, avec des modifications basées sur les travaux réalisés pour le développement de ISO 17067.

Pour le découpage et le soudage, les normes australiennes et néo-zélandaises font référence à la série AS/NZS 1554 *Structural steel welding*. Les versions actuelles de ces normes sont :

AS/NZS 1554.1:2014 *Structural steel welding, Part 1: Welding of Steel Structures*, neuvième édition 2014

AS/NZS 1554.4:2014 *Structural steel welding, Part 4: Welding of High Strength Quenched and Tempered Steels*, quatrième édition 2014

AS/NZS 1554.5:2014 *Structural steel welding, Part 5: Welding of Steel Structures Subject to High Levels of Fatigue Loading*, cinquième édition 2014

## Japon

L'Architecture Institute of Japan (AIJ) rédige les normes de conception et les spécifications d'exécution pour la construction en acier. La Japan Society of Steel Construction (JSSC) est une autre organisation liée à la fabrication de l'acier. La Japan Welding Engineering Society (JWES) traite des normes de soudage et de découpage.

La *Japanese Architectural Standard Specification 6 (JASS 6) Structural Steelwork Specification for Building Construction* est disponible en anglais. Une version mise à jour de JASS 6 a été publiée en 2018 libellée 11<sup>e</sup> édition. Aucune date n'a été fixée pour une traduction en anglais de la version la plus récente.

Toutes les autres normes sont uniquement disponibles en japonais. Par conséquent, les exigences de ces normes ne sont pas incluses dans le champ d'application de ce Guide.

## Types de chargements

Différents types de structures sont chargés de différentes manières. Les quatre principaux types de chargements sont : statique, cyclique, sismique et d'impact. Il existe d'autres types de chargements, mais ils ne seront pas abordés aux fins de ce Guide. Les exigences de conception pour chaque type de chargement doivent être traitées différemment. En outre, les exigences relatives au traitement des trous de boulons, des bords coupés et des éléments marqués au plasma peuvent être différentes pour chaque type de chargement. Par exemple, un bâtiment est généralement une structure à charge statique, tandis qu'un pont est une structure à charge cyclique et il existe donc différentes exigences de conception.

### Chargement statique

Le chargement statique inclut la charge morte de la structure, mais comprend également les charges vives et les charges environnementales telles que les charges dues au vent ou à la neige. La plupart des bâtiments ne sont soumis qu'à des charges statiques, à l'exception des charges sismiques qui seront abordées plus tard. Étant donné que les charges dues au vent et à la neige sont appliquées lentement et que la structure se déforme lentement, le taux de contrainte est faible et de telles charges sont donc considérées comme des charges statiques.

En général, lorsqu'un chargement cyclique ou sismique est impliqué, les normes ajoutent ou modifient les exigences pour les applications de chargement statique, rendant généralement les exigences plus strictes. En conséquence, les exigences pour les applications statiques forment une spécification de base qui devient applicable à tous les types de conditions de chargement. Ainsi, dans les situations où il n'y a pas d'exigences supplémentaires uniques pour les applications cycliques, les exigences statiques continueront de s'appliquer ; une situation similaire existe pour les applications sismiques.

## Chargement cyclique

Le chargement cyclique implique une charge vive répétée appliquée à la structure ; cela peut aussi s'appeler chargement de fatigue. L'Annexe 3 de AISC 360-16 définit la fatigue comme étant « l'état limite d'initiation et de croissance d'une fissure résultant de l'application répétée de charges vives ». L'ISC indique également à la section B3.11 qu'« il n'est pas nécessaire de prendre en compte la fatigue pour atténuer les effets sismiques ou les effets de chargement du vent sur les systèmes de construction résistants à la force latérale et sur les composants de l'enceinte d'un bâtiment. » (ISC 360, 2016). Des structures soumises à un chargement cyclique ayant des trous de boulons et des bords découpés thermiquement et un marquage thermique peuvent être nécessaires pour répondre à des exigences plus strictes que celles des structures chargées statiquement.

## Chargement sismique

Le chargement sismique se produit lors de séismes. Ce type de chargement peut être qualifié de chargement inélastique, car on s'attend à ce que des parties localisées de la structure soient soumises à des contraintes dans la mesure où une déformation permanente se produirait lors d'événements sismiques majeurs. Le chargement sismique peut également être qualifié de « fatigue à faible cycle », car le nombre de cycles résultant de l'événement sismique est faible. Les exigences relatives aux trous de boulons, aux bords découpés thermiquement et au marquage plasma peuvent être plus strictes lorsqu'une structure est conçue pour un événement sismique, par rapport à une structure conçue pour un chargement statique. Cela implique de s'assurer que la rugosité de la surface se trouve dans les limites et que les entailles sont réduites au minimum sur les trous de boulons ou les bords découpés thermiquement. Ces exigences plus strictes peuvent être appliquées aux éléments et aux assemblages qui résistent au chargement sismique, mais ne sont pas applicables aux éléments et aux assemblages qui résistent uniquement au chargement dû à la gravité.

## Chargement d'impact

Le chargement non actif, parfois appelé chargement dynamique, implique l'introduction rapide de la charge et l'effet correspondant de vitesses de déformation plus élevées. Un tel chargement est souvent causé par des forces d'inertie importantes, auxquelles résistent une masse et une rigidité importantes, pour provoquer une décélération rapide. Le chargement explosif fait également partie de cette catégorie. La résistance aux explosions étant une application de construction spécialisée, ce Guide ne traite pas de ce sujet ni des autres formes de chargement par impact.



## Jointts boulonnés

Les exigences en matière de résistance de la conception, d'installation et de contrôle pour un assemblage boulonné structural dépendent du type de joint boulonné choisi par l'Ingénieur. L'Ingénieur fournit le type de joint boulonné dans les documents de conception. Le type de joint boulonné est également indiqué sur les dessins d'atelier et les plans de montage.

Les désignations des jointts boulonnés fournissent les informations nécessaires à l'installation et à l'inspection des assemblages à boulonner, plutôt que de définir le mécanisme de transfert de charge. Il existe trois types de jointts boulonnés : Bien serré (ST), Précontraint (PT) et antiglissement (SC), comme décrit dans le Tableau 2.

| TABLEAU 2. TYPES DE JOINTTS BOULONNÉS |                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Type de joint <sup>1</sup>            | Fonction d'assemblage                                                                                                                                    |
| Bien serré (ST)                       | Résistance au chargement de cisaillement/appui.                                                                                                          |
| Précontraint (PT)                     | Résistance au chargement de cisaillement/appui.<br>La prétension du boulon est nécessaire, mais pour des raisons autres que la résistance au glissement. |
| Antiglissement (SC)                   | La résistance au cisaillement par friction sur les surfaces de contact est requise.                                                                      |

<sup>1</sup> Ces termes sont utilisés par l'American Institute of Steel Construction (AISC) et le Research Council on Structural Connections (RCSC). Les termes figurant dans d'autres normes peuvent être différents.

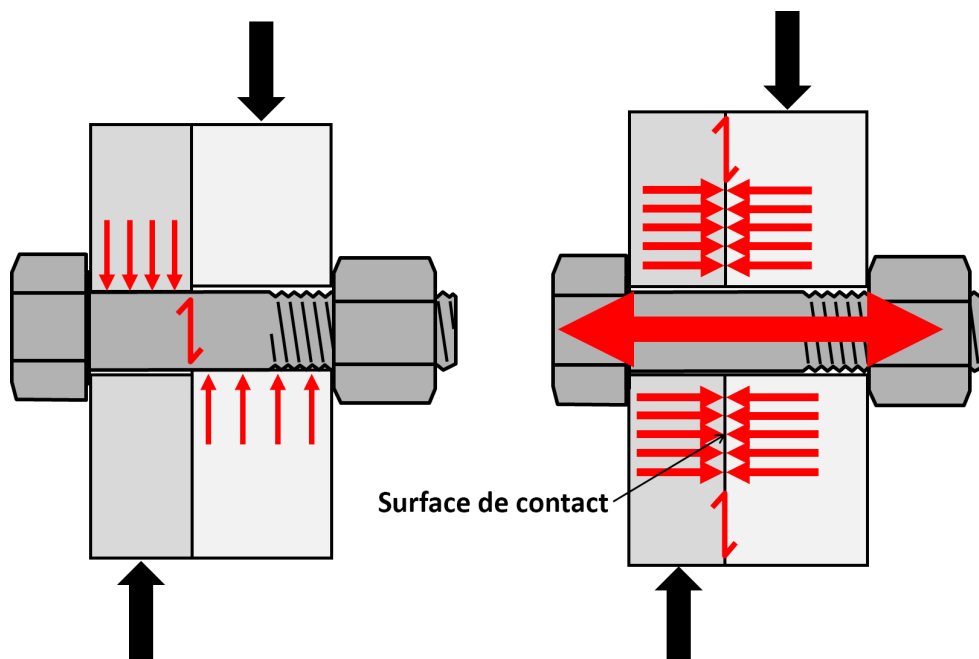


Figure 1. Exemple d'assemblage boulonné serré à bloc (gauche) ou antiglissement (droite)

## JointS bien serrés

Les joints bien serrés sont les joints boulonnés les plus courants dans les structures de bâtiment. Comme la charge est transférée par cisaillement à travers le boulon qui appuie contre le côté des trous de boulons, il n'est pas nécessaire de fournir un niveau de tension élevé dans le boulon. Au lieu de cela, les couches d'acier du joint sont simplement assemblées par les boulons eux-mêmes, utilisant tous les efforts nécessaires pour créer la tension de boulon nécessaire pour que les couches d'acier soient en contact étroit (Figure 1).

La *spécification* RCSC 2014 définit un joint bien serré comme « un joint dans lequel les boulons ont été installés conformément à la Section 8.1. La condition bien serrée est le serrage obtenu avec quelques impacts d'une clé à chocs ou le plein effort d'un monteur de charpentes utilisant une clé à molette ordinaire pour rapprocher fermement les couches » (RCSC, 2014).

Lorsque vous utilisez des joints bien serrés, seuls les trous standard et les trous oblongs chargés transversalement à la longueur de la fente sont autorisés par RCSC. Les trous surdimensionnés, ainsi que les trous oblongs chargés dans une direction autre qu'approximativement normale (entre 80 et 100 degrés) sont interdits, car ils autoriseraient un trop grand mouvement dans le joint, pendant la construction ou après l'occupation en vertu de l'application des charges de service.

Les joints bien serrés ne sont pas autorisés pour les applications de fatigue par RCSC. Si les charges vives répétées faisaient en sorte que les couches assemblées glissaient de manière répétée l'une contre l'autre, une fatigue par frottement à la surface des couches d'acier pourrait éventuellement se produire. Si le boulon est chargé en tension cyclique, il risque de céder en fatigue de traction.

Dans d'autres parties du monde, les normes de construction en acier utilisent des termes qui expriment le même concept, tels que « joints non préchargés ».

## JointS précontraints

Les joints précontraints diffèrent des joints bien serrés en ce que les boulons sont serrés de manière à obtenir la prétension requise. Le terme de prétension est utilisé parce que la tension dans le boulon provient de l'installation plutôt que de la charge appliquée. Le transfert de charge est le même que pour les joints bien serrés : cisaillement le long du corps du boulon et appui sur les côtés des trous de boulon.

La *spécification* RCSC 2014 définit un joint précontraint comme « un joint transmettant des charges de cisaillement et/ou de traction dans lesquels les boulons ont été installés conformément à la Section 8.2 afin de fournir une prétension dans le boulon installé ». Il existe actuellement quatre méthodes d'installation fournies dans la spécification RCSC.

Lorsque vous utilisez des joints précontraints, seuls les trous standard et les trous oblongs chargés transversalement à la longueur de la fente sont autorisés. Les trous surdimensionnés, ainsi que les trous oblongs chargés dans une direction autre qu'approximativement normale (entre 80 et 100 degrés) sont interdits, car ils autoriseraient un trop grand mouvement dans le joint, pendant la construction ou après l'occupation en vertu de l'application des charges de service.

Bien que les boulons soient prétendus à un niveau très élevé dans un joint précontraint et que l'acier soit étroitement serré, il existe peu de contrôle sur la nature des surfaces de contact entre les strates d'acier dans le joint. Par conséquent, un joint serré pourrait encore glisser si la surface de l'acier était recouverte d'un matériau à faible coefficient de frottement ou si l'acier n'était pas correctement préparé pour fournir un niveau spécifique de résistance au glissement.

Les joints où les boulons sont chargés en tension et soumis à un chargement de fatigue sont conçus et précontraints de sorte que le boulon lui-même ne subisse pas directement la plage de contrainte de traction. Au contraire, les pièces assemblées qui sont serrées ensemble par les boulons seront soumises à une modification de la force de serrage sous charge, mais la tension du boulon restera essentiellement inchangée.

Dans d'autres parties du monde, les normes de construction en acier utilisent des termes qui expriment le même concept, tels que « joints préchargés ».

## Joint antiglissement

Le joint antiglissement utilise également des boulons précontraints, mais il comporte des contrôles supplémentaires sur les surfaces de contact entre les couches d'acier à l'intérieur du joint. Des critères sont appliqués pour garantir que les surfaces de contact fournissent la résistance au glissement requise, que l'acier soit nu ou revêtu (Figure 1).

Dans les joints antiglissement, la charge est transférée d'un élément à l'autre par friction, plutôt que par le transfert de charge de cisaillement-appui comme dans le cas des joints bien serrés et précontraints. Il y a peu de chance que les joints bougent et si cela se produisait, la charge serait alors transférée par cisaillement-appui. En raison de la résistance au glissement fournie par la force de serrage des boulons et des surfaces de contact contrôlées, des trous surdimensionnés et des trous oblongs dans une direction autre que la normale sont autorisés, en plus des trous standard et des trous oblongs chargés transversalement.

La *spécification* RCSC 2014 définit un joint antiglissement comme « un joint transmettant des charges de cisaillement en combinaison avec des charges de traction dans lesquelles les boulons ont été installés conformément à la Section 8.2 afin de fournir une prétension dans le boulon installé (force de serrage sur les surfaces de contact) et avec des surfaces de contact préparées pour offrir une résistance calculable au glissement. »

Les joints antiglisement étaient qualifiés de « joints à friction » dans les anciennes normes nord-américaines. Dans d'autres parties du monde, les normes de construction en acier utilisent des termes qui expriment le même concept, tels que « joints à friction ».

## Trous de boulons

### Trous de boulons standard (STD)

Les trous de boulons standard sont autorisés dans toutes les couches de joints bien serrés, précontraints et antiglisement. Le diamètre du trou de boulon autorisé varie en fonction du diamètre de boulon, de la norme applicable et de l'utilisation des unités de mesures américaines ou des unités du système international pour les boulons, les trous ou les deux.

### Trous de boulons surdimensionnés (OVS)

Les trous surdimensionnés permettent un dégagement supplémentaire pour l'installation des boulons et pour effectuer des ajustements mineurs au niveau des assemblages afin d'aligner les pièces. Les trous surdimensionnés sont particulièrement utiles avec des couches d'acier épaisses dans l'assemblage, car des trous d'alésage permettant l'insertion de boulons seraient difficiles et prendraient du temps. Cependant, il est plus difficile de maintenir le niveau, l'alignement et l'aplomb du bâtiment lorsque des trous de boulons surdimensionnés sont utilisés. Lorsque les spécifications applicables indiquent des dimensions de trous surdimensionnées, les valeurs des tableaux doivent être considérées comme des valeurs maximales.

### Trous de boulons à fente courte et longue

Les trous fendus permettent un dégagement supplémentaire pour l'installation des boulons et pour effectuer des ajustements au niveau des assemblages afin d'aligner les pièces ou de placer la construction dans les limites de tolérance d'aplomb (Figure 2). Cependant, il est plus difficile de maintenir l'alignement et l'aplomb du bâtiment lorsque des trous oblongs sont utilisés. Les longueurs SSL (fente courte) et LSL (fente longue) indiquées dans les tableaux des spécifications applicables sont des longueurs maximales. Vous pouvez utiliser des longueurs plus courtes si vous le souhaitez.



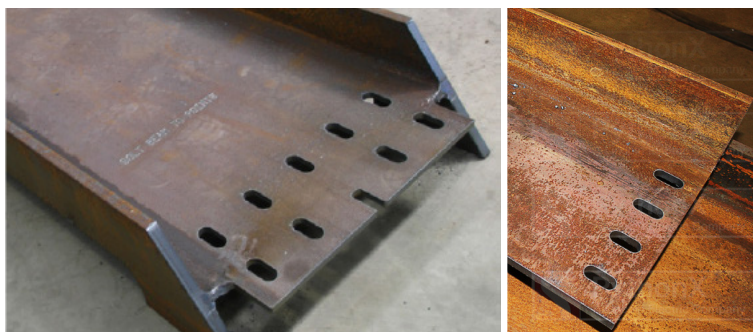


Figure 2. Exemples de trous oblongs longs

## Trous de boulons découpés au plasma

Toutes les normes de construction en acier précédemment mentionnées pour les bâtiments autorisent dans une certaine mesure l'utilisation de trous de boulons découpés au plasma, à l'exception de la norme japonaise JASS 6 (2007). Certaines normes spécifient des critères de qualité pour la surface de coupe du trou, y compris la rugosité et les gouges. Seule la norme européenne inclut des critères de pente dans le trou.

À l'exception de JASS 6, les normes autorisent le découpage thermique pour créer des fentes entre les trous percés ou perforés utilisés pour les extrémités des fentes. Là où les trous de découpage thermique sont autorisés, l'utilisation du découpage plasma pour faire tout le trou fendu réduit le temps et les efforts nécessaires. Il améliore également la qualité et la précision, car il évite les difficultés d'alignement de la surface de découpe thermique sur le point de tangence du trou poinçonné ou foré, et donc le meulage ultérieur qui pourrait être nécessaire.

Trois normes seulement traitent de la précision de l'emplacement des trous de boulons : la norme européenne EN 1090-2, la norme Australie-Nouvelle-Zélande AS/NZS 5131 et la norme japonaise JASS 6. Pour les normes nord-américaines, l'emplacement du trou est jugé suffisamment précis si les éléments assemblés sont situés dans les limites de la tolérance spécifiées.

Des restrictions sont imposées au découpage thermique des trous de boulons à des emplacements spécifiques sur des éléments en acier de construction, en fonction de l'application et de l'emplacement dans la structure. Ces emplacements peuvent inclure des trous de boulons dans des zones destinées à subir des niveaux élevés de déformation inélastique (également appelées zones d'articulation plastique) susceptibles d'être créées lors d'événements sismiques majeurs. Cette restriction n'inclut pas toutes les structures antisismiques, ni même tous les assemblages antisismiques. Dans certains assemblages, des trous découpés au plasma peuvent être autorisés dans une partie de l'assemblage, mais pas dans une autre. Le code applicable doit être consulté pour plus d'informations.

Dés études en Europe (Bannister et al, 2016, Section 8.6 : capacité de déformation plastique des bords coupés au laser et au plasma) sur des plaques d'acier de 15 mm [19/32 po] d'épaisseur indiquent que les trous coupés au plasma où le trou est initié au centre et fini à un emplacement dans le trou parallèle à la direction de déformation ont fourni une capacité de déformation adéquate pour les aciers à limite d'élasticité de 355 MPa et 460 MPa [50 et 65 ksi] à des températures de -50 °C [-60 °F] et une capacité de déformation adéquate à plus haute résistance à -20 °C [0 °F]. Cependant, il faut noter qu'il s'agissait d'essais simples de traction jusqu'à la rupture, et qui ne tiennent pas compte des déformations et des cycles répétés pouvant être rencontrés lors du chargement sismique.

Dans certaines normes, des restrictions peuvent être imposées aux trous de découpe thermiques soumis à une fatigue de cycle élevée. Les trous découpés au plasma sont souvent utilisés dans les assemblages boulonnés pour de telles applications, avec des catégories de conception antifatigue appropriées pour l'assemblage boulonné. La norme applicable doit être consultée pour connaître les limitations du cas spécifique.

## **Normes américaines**

### Applications chargées statiquement

La section M2.5 du chapitre M de AISC 360-16 intitulée *Fabrication and Erection*, indique que

« Les trous de boulons doivent être conformes aux dispositions de la RCSC *Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts* Section 3.3, ci-après dénommée *Spécification RCSC*, les trous découpés thermiquement étant néanmoins autorisés si leur profil de rugosité de surface n'excède pas 25 µm (1 000 µin.), tel que cela est défini dans ASME B46.1. »

Bien que AISC 360-16 identifie la tolérance à l'égard des trous thermiquement découpés comme une exception, la *spécification RCSC* contient un langage similaire autorisant les trous découpés thermiquement. Tant que les exigences de rugosité de surface sont satisfaites, des trous de découpage thermique, y compris au moyen de découpage plasma, peuvent être utilisés à condition qu'aucune gouge ne dépasse 2 mm [1/16 po].

Le système PythonX est capable de respecter des exigences de 25 µm (1 000 µin.), avec une valeur de rugosité de surface typique de 2 µm (75 µin.), bien supérieure aux exigences.

La section M2.2 de la norme AISC 360-16 traite du découpage thermique en général. Elle indique que les exigences des articles 5.14.5.2, 5.14.8.3 et 5.14.8.4 d'AWS D1.1/1.1M:2015 doivent être respectées. L'article 5.14.5.2 couvre les procédures de réparation. L'article 5.14.8.3 traite des exigences de rugosité pour les trous de découpe thermique, indiquant que la rugosité de surface ne doit pas être supérieure à celle représentée par l'échantillon 3 d'AWS C4.1-77, *Criteria for Describing Oxygen-Cut Surfaces and Oxygen Cutting Surface Roughness Gauge*. L'article 5.14.8.4 couvre les limitations en termes d'entailles et de gouge exigeant que la rugosité de surface supérieure à celle représentée par l'échantillon 3 et les gouges supérieures à 5 mm [3/16 po] soient réparées par usinage ou meulage. La section M2.2

d'AISC 360-16 indique également que les bords libres non sujets à la fatigue ne doivent pas avoir de gouges supérieures à 5 mm [3/16 po] de profondeur et que les entailles supérieures à 5 mm [3/16 po] de profondeur doivent être enlevées par meulage ou réparées par soudure.

Les gouges nécessitant des réparations ne devraient pas être choses courantes avec un système PythonX en bon état de fonctionnement.

La Section 3.3 de la *spécification RCSC 2014* permet de découper thermiquement des trous dans des joints soumis à une charge statique, à condition qu'ils soient produits d'une façon qui soit guidée mécaniquement, à condition que la rugosité de la surface ne dépasse pas 25 µm [1 000 micro-pouces]. RCSC limite également les « gouges occasionnelles » d'une profondeur maximale de 2 mm [1/16 po]. Les trous découpés thermiquement à main levée et les trous découpés thermiquement pour les applications cycliques sont autorisés « sous réserve de l'approbation de l'Ingénieur officiel ». Pour les trous découpés à main levée, le commentaire de la RCSC indique que le trou devra généralement être rectifié afin d'obtenir une rugosité de surface maximale de 25 µm [1 000 micromètres].

Le système PythonX étant un système mécanisé, ces dispositions impliquant le découpage à la main ne sont pas applicables.

#### Applications cycliquement chargées

Le critère d'AISC 360 pour les assemblages à charge cyclique est principalement contenu dans l'Annexe 3 de cette norme. Le contenu du reste d'AISC 360 s'applique aux assemblages à charge cyclique, sauf modification en annexe. L'Annexe 3 n'indique aucune restriction quant à la méthode de fabrication des trous de boulons autres que celles décrites dans la norme AISC 360. Comme indiqué dans le commentaire de la RCSC susmentionné, il est important de reconnaître que le type d'assemblage boulonné (c'est-à-dire si un glissement se produit ou non) déterminera le point d'initiation potentiel d'une fissure de fatigue. Les assemblages boulonnés décrits à l'Annexe 3 doivent obligatoirement être réalisés avec des boulons à haute résistance installés pour répondre aux exigences en matière de résistance au glissement.

Un système PythonX devrait être acceptable pour la production de trous pour les structures à charge cyclique, lorsque le type d'assemblage boulonné approprié est spécifié.

Le commentaire de la Section 3.2.2 de la CRCR stipule que

« Pour les joints soumis à des charges cycliques, les résultats des tests ont montré que, lorsqu'aucun glissement important ne se produit dans le joint, la rupture par fatigue se produit généralement dans la section brute avant une rupture par fatigue dans la section nette (Kulak et al., 1987, p. 116, 117). Inversement, lorsque le glissement se produit dans les joints d'assemblages chargés cycliquement, la rupture se produit généralement dans la section nette et le bord d'un trou de boulon devient le point d'initiation de la fissure (Kulak et al., 1987, p. 118). Par conséquent, pour les assemblages soumis à une charge cyclique et à conception

antiglisement, la méthode utilisée pour produire des trous de boulons (découpe thermique ou perçage) ne devrait pas influencer significativement la charge de rupture, la défaillance se produisant généralement dans la section brute en l'absence de glissement majeur. »

Les spécifications RCSC autorisent le découpage thermique des trous de boulons avec un système PythonX, avec l'aval de l'Ingénieur. Le commentaire fournit une justification pour l'utilisation de trous découpés thermiquement lorsque des assemblages antiglisement sont utilisés.

### Applications chargées sismiquement

AISC 358-16 répertorie neuf assemblages d'armatures à moment pouvant être utilisés dans un bâtiment sans tests supplémentaires et qui sont donc identifiés comme étant préqualifiés. Les exigences générales pour les assemblages préqualifiés sont énumérées aux chapitres 1 à 4. Les exigences spécifiques pour les assemblages préqualifiés individuels sont énumérées dans les chapitres suivants. Les exigences générales en matière de boulonnage pour les assemblages à moment préqualifiés figurent au Chapitre 4 de cette spécification ; aucune restriction sur les trous découpés au plasma n'est donnée dans ce chapitre.

Les trous découpés au plasma peuvent être utilisés pour les assemblages à moment préqualifiés suivants répertoriés dans AISC 358-16 :

- ▶ Assemblage à moment de poutre à section réduite (RBS)
- ▶ Assemblages à moment rigide de plaque d'extrémité en extension boulonnée, non rigidifiée et rigidifiée
- ▶ Assemblage à moment de bandes de brides soudées non renforcées (WUF-W)
- ▶ Assemblage à moment de plaque latérale
- ▶ Assemblage à moment d'armature Simpson Strong-Tie

Dans le cas de l'assemblage à moment préqualifié en double T, les trous de boulons dans les tourillons en T et les brides des poutres doivent être percés ou sous-poinçonnés et alésés, ce qui empêche toute découpe thermique. Cependant, les trous de boulons dans la languette de cisaillement et la bande de poutre peuvent être découpés thermiquement. Aucune restriction concernant le découpage thermique des trous dans la colonne n'est répertoriée dans AISC 358-16.

L'assemblage à moment de la section de poutre réduite (RBS) ne contient aucune restriction quant aux trous découpés au plasma, et le PythonX peut être utilisé pour couper les trous de boulons de bande, les trous d'accès de soudure et les sections de poutre réduites associées à ce détail d'assemblage.

L'assemblage à moment de bandes de brides soudées non renforcées (WUF-W) ne comporte aucune restriction quant aux trous découpés au plasma et le PythonX peut être utilisé pour découper les trous des boulons de bande ainsi que les trous spéciaux d'accès à la soudure qui sont requis en vertu du statut préqualifié de l'assemblage.

Outre les assemblages sismiques où les trous thermiquement percés sont autorisés, AISC 358-16 limite la méthode de production de trous par perçage, ou sous-poinçonnage et l'alésage aux assemblages suivants :

- ▶ Assemblage à moment de plaque à bride boulonnée (BFP)
- ▶ Assemblage à moment support boulonné Kaiser (KBB)
- ▶ Assemblage à moment CONXTECH CONXL

En raison de la nature de ces assemblages, il est peu probable que les composants des assemblages à moment de support boulonné Kaiser (KBB) et de CONXTECH CONXL soient fabriqués avec un système PythonX. Bien qu'il soit souhaitable de découper thermiquement les trous pour les assemblages à moment de plaque à bride boulonnée, aucun test n'a été effectué pour déterminer la pertinence des trous produits de cette manière.

Pour les assemblages à moment sismiques non répertoriés dans AISC 341, des tests peuvent être effectués conformément à la section K d'AISC 358-16. Lorsque cela est fait, la méthode de production du trou est une « variable préqualifiée (voir AISC 358-16, section K1.4f(e)). Si des trous sont découpés thermiquement pendant l'échantillon d'essai, des trous découpés thermiquement peuvent être utilisés dans la production ; si des trous percés sont utilisés pendant l'échantillon d'essai, les trous thermiquement coupés ne peuvent pas être utilisés dans la production.

## **Normes canadiennes**

### Applications chargées statiquement

CSA S16:2014 traite des trous découpés thermiquement dans la Section 28.4.3, de la façon suivante :

« Les trous découpés thermiquement produits par une machine guidée peuvent être utilisés dans des structures à charge statique si la taille réelle du trou ne dépasse pas la taille nominale du trou de plus de 1 mm. Des gouges ne dépassant pas 1,5 mm de profondeur peuvent être autorisées sur les bords des fentes découpées thermiquement. Les trous de fixation découpés manuellement ne peuvent être autorisés qu'avec l'approbation du concepteur. »

PythonX est acceptable pour la création de trous pour les applications à charge statique, comme indiqué par CSA S16:2014.

### Applications cycliquement chargées

Aucune exigence supplémentaire n'est répertoriée.



### Applications chargées sismiquement

L'article 28.4.2 de la norme CSA S16:2014 sur les trous des charnières en plastique exige que les trous situés dans une région de charnière en plastique soient « ... soit sous-poinçonnés et alésés, soit percés à fond ». Pour garantir que les trous sont sous-poinçonnés et alésés ou percés, l'article 28.4.2 stipule en outre que « Cette exigence doit être notée sur les dessins de conception et les détails d'atelier. »

## **Normes européennes**

### Applications chargées statiquement

Les normes européennes qualifient de « perforation » les trous de boulons. La Section 6.6.3 d'EN 1090-2:2018 autorise la perforation et précise : « ... peut être formé par tout procédé (perçage, poinçonnage, laser, plasma ou autre découpage thermique)... » La Section 6.6.3 énumère deux exigences principales quant à la technique à utiliser, les exigences de dureté et de qualité de la section 6.4 doivent être satisfaites, et les trous doivent permettre aux fixations de s'insérer librement dans les trous des éléments assemblés.

EN1090-2 répertorie un certain nombre de tolérances dimensionnelles liées à la taille du trou, à l'emplacement et à l'angle de coupe. Ces tolérances doivent être examinées dans EN1090-2 avant le début de la perforation.

Le système PythonX peut être utilisé pour produire des trous de boulons en vertu de la norme EN 1090-2, à condition que la procédure de coupe soit qualifiée (voir EN 1090-2 Annexe D) et que les résultats du test respectent la dureté requise (le cas échéant), la rugosité de surface et les exigences de dégression.

### Applications cycliquement chargées

Aucune exigence supplémentaire n'est répertoriée.

### Applications chargées sismiquement

Aucune exigence supplémentaire n'est répertoriée.

## **Normes australiennes et néo-zélandaises**

### Applications chargées statiquement

Les normes combinées australiennes et néo-zélandaises, similaires aux normes européennes, qualifient de « perforation » les trous. AS/NZS 5131:2016 Section 6.7.1 Méthodes de perforation permet « ... soit une découpe à la machine... », soit un certain nombre d'autres options de poinçonnage, perçage et alésage pour la fabrication de trous de boulons. Le découpage à la machine inclut les méthodes de découpage thermique décrites à la Section 6.5.1 qui stipule :

« Les aciers peuvent être coupés selon un procédé de sciage, de cisaillement, de découpage, d'usinage, de découpage thermique (y compris le découpage au laser et au plasma) ou de découpage à l'eau, sauf si certains procédés sont autrement exclus, comme indiqué dans les spécifications de construction ou ailleurs dans la présente norme. »

Le système PythonX peut être utilisé pour créer des trous lors des constructions aux normes australiennes et néo-zélandaises.

#### Applications cycliquement chargées

Aucune exigence supplémentaire n'est répertoriée.

#### Applications chargées sismiquement

Pour la Nouvelle-Zélande uniquement, l'article 6.13.2 de la norme AS/NZS 5131:2016 exige que les trous de boulons situés dans les zones de plasticité de catégories 1, 2 ou 3 aient une rugosité maximale (CLA)  $\leq 12 \mu\text{m}$ . Les trous de boulons dans les zones de plasticité des ponts de chemin de fer ne doivent pas être « découpés au chalumeau ».

### **Normes japonaises**

#### Applications chargées statiquement

Au Japon, la zone de forte sismicité fait que les bâtiments sont construits pour résister aux charges sismiques. Il n'y a pas de dispositions spécifiques aux applications statiques.

#### Applications chargées sismiquement

Comme il a été dit précédemment, étant donné la forte zone sismique du Japon, les bâtiments sont construits pour résister aux charges sismiques. La Section 4.9 de JASS 6 (2007) exige que tous les trous de boulons soient percés, avec quelques exceptions permettant des trous poinçonnés. Les bâtiments en acier typiques au Japon utilisent une configuration d'assemblage boulonnée qui place bon nombre de leurs trous de boulons dans les zones de charnière plastique. Les trous thermiques sont généralement interdits.

Une exception est expliquée à la Section 4.9 *Perçage* :

« La découpe au gaz peut être utilisée pour les trous d'un diamètre égal ou supérieur à 30 mm, pour les boulons d'ancrage, les séparateurs de coffrage et la tuyauterie des équipements, ainsi que pour les trous destinés aux fixations métalliques, aux travaux de finition intérieure et extérieure, à la mise en place du béton, etc. La rugosité des trous réalisés par découpage au gaz ne doit pas dépasser  $100 \mu\text{mRz}$ , et la précision du diamètre du trou doit être de  $\pm 2 \text{ mm}$ . »

Il n'est pas clair si cette exception aux trous percés, accordée pour le « découpage au gaz », s'étend ou non au découpage plasma. L'utilisateur de ce Guide devra consulter l'ingénieur officiel ou un autre responsable technique pour savoir si cette exception s'applique au découpage avec un PythonX.

### Applications cycliquement chargées

Les traductions anglaises des exigences japonaises pour les applications à chargement cyclique ne sont pas disponibles actuellement et ne sont donc pas traitées dans ce Guide.

Les utilisateurs de PythonX doivent contacter l'ingénieur officiel ou un autre responsable technique pour savoir si les trous découpés au plasma sont acceptables pour les applications à charge cyclique.

## Bords découpés au plasma

Les bords coupés doivent être considérés séparément des trous pour plusieurs raisons. Les bords ne sont jamais associés à des assemblages boulonnés. Comme indiqué dans la discussion précédente, il existe de nombreuses règles applicables aux trous découpés au plasma, en partie parce que les assemblages boulonnés ont d'abord été évalués avec des trous percés ou poinçonnés, la découpe au plasma de trous pour les assemblages boulonnés étant un développement plus récent. En ce qui concerne les bords découpés au plasma, l'ancienne technologie ne consistait pas en une coupe mécanique, mais en une coupe par oxycoupage, un autre processus de coupe thermique. L'acceptation du découpage plasma en tant qu'alternative à l'oxycoupage est moins complexe et, en général, est autorisée par la plupart des normes. Les normes de qualité sont imposées par diverses normes et des configurations géométriques peuvent être spécifiées (telles que les dimensions minimales du rayon).

Les bords découpés au plasma appartiennent à un certain nombre de catégories différentes. Pour les besoins de ce Guide, ils seront séparés en quatre catégories : bords libres, pénétrations de bande, trous d'accès aux soudures et chapes de poutre. Il y aura également une section séparée sur le découpage thermique des sections de poutre réduites, un détail généralement associé aux applications sismiques.

### Bords libres

Le terme « bord libre » est utilisé pour identifier les emplacements qui forment un bord pour l'élément, qu'il s'agisse d'une bande ou d'une bride, plutôt que d'un emplacement faisant partie d'un joint soudé. Les bords des éléments, découpés thermiquement dans la largeur ou la forme, ou simplement rognés pour éliminer les bords cisailés et laminés, le cas échéant, doivent satisfaire aux exigences de qualité de la norme applicable.

## **Normes américaines**

La Section M2.2 de la norme AISC 360-16 sur la découpe thermique stipule que les exigences des articles 5.14.5.2, 5.14.8.3 et 5.14.8.4 d'AWS D1.1/D1.1M:2015 acceptent les exceptions suivantes : les bords libres découpés thermiquement et non sujets à la fatigue doivent être exempts de gouges à fond arrondi de plus de 5 mm [3/16 po] de profondeur et exempts d'encoches en V pointues. Les gouges supérieures à celles autorisées doivent être corrigées par meulage ou réparation par soudure.

L'article 5.14.8 de la norme AWS D1.1/D1.1M:2015 reconnaît « les processus de coupage et de gougeage à l'arc électrique (y compris le coupage et le gougeage à l'arc plasma)... ». Les coupes doivent être lisses et exemptes de fissures et d'entailles. Pour les structures chargées cycliquement, la coupe à main levée n'est autorisée que lorsque l'Ingénieur l'a approuvée.

L'article 5.14.8.3 de la norme AWS D1.1/D1.1M:2015 définit les limites de rugosité de surface indiquées dans le Tableau 3.

**TABLEAU 3. AWS D1.1/D1.1M:2015 RUGOSITÉ DE SURFACE MAXIMALE POUR LES BORDS DÉCOUPÉS THERMIQUEMENT**

| Épaisseur du matériau                                                           |              | Rugosité de surface maximale<br>Exemple AWS C4.1-77 |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------|
| pouce                                                                           | mm           |                                                     |
| jusqu'à 4                                                                       | jusqu'à 100  | 3                                                   |
| de 4 à 8                                                                        | de 100 à 200 | 2                                                   |
| extrémités des éléments (non soumises à une contrainte calculée aux extrémités) |              | 2                                                   |

L'utilisateur de ce Guide est renvoyé à l'article 5.14.8.4 de la norme AWS D1.1/D1.1M:2015 s'agissant des exigences supplémentaires en matière de tolérance en terme d'entailles.

Un système PythonX en bon état de fonctionnement répond aux critères AWS D1.1. Aucune approbation de l'Ingénieur n'est nécessaire pour les structures chargées cycliquement, car le PythonX n'utilise pas de « découpage à main levée ».

## **Normes canadiennes**

Dans l'article 28.2 de la norme CSA S16-14 sur le découpage thermique, le découpage thermique guidé par machine est autorisé et les bords découpés doivent satisfaire aux exigences de CSA W59. L'article 28.3.1 de la norme CSA S16-14 continue en indiquant que le rabotage ou la finition après coupe (c.-à-d. l'usinage ou le meulage) n'est pas nécessaire pour les bords coupés thermiquement à moins que cela soit noté sur les dessins ou stipulé pour la préparation des bords en vue d'un soudage.

L'article 5.3.3 de la norme CSA W59-18 indique les limites de rugosité de surface indiquées dans le Tableau 4.

TABLEAU 4. CSA W59-18 RUGOSITÉ DE SURFACE MAXIMALE POUR LES BORDS DÉCOUPÉS THERMIQUEMENT

| Épaisseur du matériau                                                           |             | Rugosité de surface maximale |       |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------|-------|
| mm                                                                              | pouce       | µm                           | µin   |
| jusqu'à 100                                                                     | jusqu'à 4   | 25                           | 1 000 |
| de 100 à 200                                                                    | de 4 à 8 po | 50                           | 2 000 |
| extrémités des éléments (non soumises à une contrainte calculée aux extrémités) |             | 50                           | 2 000 |

L'utilisateur de ce Guide est prié de consulter l'article 5.3.4 de la norme CSA W59-18 pour connaître les exigences supplémentaires en matière de tolérance sur les entailles.

Un système PythonX en bon état de fonctionnement répond aux critères de CSA S16 et de CSA W59.

### Normes européennes

La Section 6.4.1 de la norme EN 1090-2:2018 impose que le découpage des bords libres respecte les exigences de rugosité de surface, de géométrie et de dureté maximale. Elle indique que « les méthodes de coupe connues et reconnues sont le sciage, le cisailage, le découpage à disque, les techniques au jet d'eau et le découpage thermique. » La découpe thermique manuelle est limitée aux situations dans lesquelles la découpe thermique à la machine n'est pas réalisable.

Le Tableau 9 de la norme EN 1090-2:2018 définit les exigences de rugosité de surface à évaluer à l'aide de l'article 7.2.3 de la norme ISO 9013:2017 comme indiqué dans le Tableau 5.

TABLEAU 5. EN 1090-2:2018 EXIGENCES DE RUGOSITÉ DE SURFACE POUR LES BORDS LIBRES

| Classe d'exécution | Critères                                                                                                 |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EXC1               | Les bords découpés doivent être exempts d'irrégularités importantes et les scories doivent être enlevées |
| EXC2, EXC3 et EXC4 | Hauteur moyenne du profil, Rz5 = plage 4<br>110 + [1,8 a], où a = épaisseur de la pièce en mm            |

Le Tableau 9 de la norme EN 1090-2:2018 contient également des critères d'acceptation pour la perpendicularité d'un bord de coupe thermique, en faisant référence à ISO 9013:2017, paragraphe 7.2.2. Le Tableau 7 indique la tolérance requise pour la perpendicularité ou l'angularité, u. Voir le Tableau 6 pour la classe d'exécution fournie.

TABLEAU 6. EN 1090-2:2018 TOLÉRANCE DE PERPENDICULARITÉ OU D'ANGULARITÉ

| Classe d'exécution | Critères                                                                                                 |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EXC1               | Les bords découpés doivent être exempts d'irrégularités importantes et les scories doivent être enlevées |
| EXC2               | Plage 5                                                                                                  |
| EXC3 et EXC4       | Plage 4                                                                                                  |



TABLEAU 7. ISO 9013:2017, TABLEAU 4 TOLÉRANCE DE PERPENDICULARITÉ OU D'ANGULARITÉ, U

| Plage | Tableau 4 - Tolérance de perpendicularité ou angularité, u [mm] |
|-------|-----------------------------------------------------------------|
| 1     | 0,05 + 0,003 a                                                  |
| 2     | 0,15 + 0,007 a                                                  |
| 3     | 0,4 + 0,01 a                                                    |
| 4     | 0,8 + 0,02 a                                                    |
| 5     | 1,2 + 0,035 a                                                   |

a = épaisseur de la pièce

L'oxycoupage au gaz produira généralement un bord très proche de 90°. On peut s'attendre à ce que le découpage plasma classique donne un bord perpendiculaire à  $\pm 2^\circ$ . Cette valeur de  $\pm 2^\circ$  peut être améliorée en utilisant un découpage plasma amélioré et un contrôle précis de l'angle de la torche. Le petit écart par rapport à l'angle droit crée rarement des problèmes de montage.

Le système PythonX est capable de maintenir la dégression sous  $1^\circ$ , avec une valeur moyenne de  $0,5^\circ$ . Parce que le découpage plasma crée généralement un léger biseau sur une face coupée et un bord à angle relativement droit sur l'autre face coupée, PythonX effectue toutes ses coupes dans le sens des aiguilles d'une montre ou de gauche à droite et, à l'aide d'un procédé breveté, ajuste l'angle de la torche pour améliorer la perpendicularité des trous. Un réglage global sur le PythonX permet d'inverser le sens de la coupe.

EN 1090-2:2018 limite également la dureté superficielle des aciers au carbone ayant une limite d'élasticité de 460 MPa ou plus (65 ksi ou plus) à un maximum de 450 (HV10). Lorsque la dureté de telles surfaces de bord libre dépasse cette limite, il est recommandé de préchauffer l'acier avant la découpe. Voir ISO 6507 pour la méthode de test.

Pour le chargement cyclique, EN 1090-2:2018 avertit que certaines méthodes de découpe peuvent ne pas convenir aux composants sujets à la fatigue. S'il existe un problème quant à l'applicabilité des bords découpés thermiquement dans une situation de fatigue, il convient de consulter d'autres codes et normes et de consulter l'ingénieur responsable du dossier ou un autre responsable technique.

## **Normes australiennes et néo-zélandaises**

Les méthodes de coupe autorisées en vertu de l'article 6.5.1 de la norme AS/NZS 5131:2016 sont « le sciage, le cisaillement, le découpage, l'usinage, le découpage thermique (y compris le découpage au laser et au plasma) ou le découpage à l'eau, sauf si certains procédés sont autrement exclus, comme indiqué dans les spécifications de construction ou ailleurs dans la présente norme. »

Dans l'article 5.1.2 de la norme AS/NZS 1554.1:2014 sur le soudage des aciers de construction, il est renvoyé à la référence AS 3990 Équipements mécaniques - Pièces métalliques, AS 4100 sur les structures en acier pour les exigences relatives aux bords non incorporés dans un joint soudé. Le Tableau 8 indique

les exigences de rugosité de surface données dans AS/NZS 4100. La norme AS/NZS 1554.4:2014 sur le soudage d'aciers trempés et revenus à haute résistance et sur le soudage de structures en acier soumises à des niveaux de charge de fatigue élevés est identique à AS/NZS 1554.1:2014 en ce qui concerne les surfaces des bords découpés thermiquement non incorporés dans un joint soudé.

TABLEAU 8. AS 4100 TABLEAU 14.3.3 RUGOSITÉ MAXIMALE DE LA SURFACE COUPÉE

| Applications                                                                                               | Rugosité maximale (CLA)<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Applications normales, c'est-à-dire où la face et les bords restent tels quels ou avec un pansement mineur | 25                                           |
| Applications de fatigue (catégories de détails)                                                            |                                              |
| - catégorie de détail $\geq 80$ MPa                                                                        | 12                                           |
| - catégorie de détail $< 80$ MPa                                                                           | 25                                           |

#### Remarques

- 1 Les valeurs de rugosité peuvent être estimées par comparaison avec des répliques de surface, telles que les répliques de surface WTIA Flame Cut.
- 2 La technique de découpage au chalumeau appropriée est décrite dans la note technique 5 de WTIA.
- 3 CLA = Méthode du plan médian (voir AS 2382).

## Normes japonaises

La Section 4.6 de la norme JASS 6 (2007) sur la découpe et l'usinage, rubrique (1), permet d'effectuer la découpe selon « ... la méthode la plus appropriée, telle que la découpe à la machine, la découpe au gaz ou le découpage plasma... ». La Section 4.6 rubriques (3) et (4) exige que la rugosité de la surface ne dépasse pas  $100 \mu\text{m Rz}$  et que la profondeur de l'encoche ne dépasse pas 1 mm [1/32 po] et précise que, si la rugosité de la surface ou la profondeur de l'entaille ne répond pas à ces exigences, les bords peuvent être pansés par meulage.

## Pénétrations de bande et coins rentrants

Les pénétrations de bande sont souvent nécessaires pour loger les conduits de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) d'un bâtiment, mais également pour permettre l'accès à d'autres systèmes mécaniques, de plomberie et d'électricité. Dans certaines structures, les pénétrations de bande sont utilisées à des fins architecturales, pour réduire le poids et pour les constructions utilisant des systèmes de poutres ou de planchers sur mesure.

Les pénétrations doivent être découpées avec précision aux dimensions requises, sans enlever plus de matériau que nécessaire ; un retrait excessif affaiblira l'élément. Les coins doivent être lisses et arrondis pour réduire les concentrations de contraintes et exempts d'encoches.

Un grand nombre d'exigences applicables aux pénétrations de bande et aux coins rentrants ont déjà été énoncées dans les exigences relatives aux bords libres, à quelques exceptions près qui seront expliquées ici.

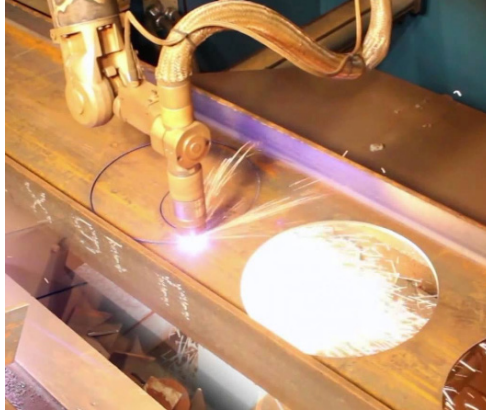


Figure 3. Exemples de pénétrations de bande

### **Normes américaines**

Les exigences de la norme AISC 360-16 M2.2, décrites précédemment, s'appliquent aux pénétrations de la bande et aux angles rentrants. Les coins rentrants doivent avoir une transition courbe, mais aucun rayon minimum n'est requis. Il est suggéré qu'un rayon de 13 à 10 mm (1/2 à 3/8 po) soit acceptable pour les coins rentrants dans les conditions de charge statique.

L'article 5.15 d'AWS D1.1/D1.1M:2015 traite spécifiquement des coins rentrants. La découpe thermique est autorisée et le rayon du coin rentrant doit être d'au moins 25 mm (1 po), à l'exception des coins dans le matériau d'assemblage et les chapes de poutre. Un rayon plus grand fournit une transition en douceur pour le flux de contraintes dans l'élément. La surface découpée thermiquement n'a pas besoin d'être meulée, bien qu'un meulage soit autorisé pour se conformer aux exigences de rugosité de surface. Toutefois, il convient de noter que la norme AISC 360-16 est une exception aux articles 5.14 et 5.15 d'AWS D1.1/D1.1M:2015.

Pour les éléments chargés cycliquement, la norme AISC 360-16 Annexe 3, fournit deux dimensions de rayon, chacune avec une catégorie de fatigue différente (voir AISC 360-16, Tableau A-3.1, exemple 1.3). Les coins rentrants de rayon égal ou supérieur à 25 mm [1 po], meulés jusqu'au métal brillant, se voient attribuer une catégorie de fatigue C, tandis qu'un rayon égal ou supérieur à 10 mm [3/8 po] est un détail de catégorie E'. Dans le cas du détail de catégorie E', la surface n'a pas besoin d'être meulée et la rugosité maximale de la surface est de 1 000 µpo (25 µm), AWS C4.1, exemple 3.

### **Normes canadiennes**

À l'instar des normes américaines, l'article 28.2 de la norme OCSA S16:2014 autorise également le découpage thermique pour les coins rentrants. Le rayon de ces coins rentrants doit être aussi grand que possible avec un rayon minimum de 14 mm [9/16 po] et doit être exempt d'entailles. Ceci est également requis par CSA W59-18, article 5.3.6.

### **Normes européennes**

Pour EN1090-2:2018, la discussion précédente sur les bords libres s'applique aux coins rentrants et aux pénétrations d'âme. La Section 6.7 contient des exigences supplémentaires relatives au rayon. Deux faces qui se croisent à des angles inférieurs à 180° sont considérées comme des angles rentrants. Le rayon minimum des coins est de 5 mm [3/16 po]. Le coin doit être arrondi et les coupes excessives ne sont pas autorisées.

### **Normes australiennes et néo-zélandaises**

L'article 6.5.3 de la norme AS/NZS 5131:2016 définit un rayon minimal de 10 mm [3/8 po] et indique que les angles rentrants doivent être exempts d'encoche. Toute entaille qui se produit lors de la coupe doit être réparée. L'article 14.3.3 de la norme AS 4100 exige le même rayon minimal de 10 mm.

### **Normes japonaises**

La norme JASS 6 (2007) ne contient aucune disposition supplémentaire quant à la coupe des pénétrations de bande autres que celles destinées aux bords découpés thermiquement.

## **Chapes de poutre**

Une chape de poutre permet de placer une poutre dans une poutre de support. Une chape est créée en coupant la bride de la poutre et une partie de la bande de poutre.

Les Figures 9 et 10 de la 15e édition (voir Figure 4) de la norme AISC *Manuel de construction en acier* recommande de découper d'abord la bande, puis de découper la bride sur un biseau pour réduire le risque de laisser une entaille à l'intersection des deux coupes. Un rayon doit être laissé dans le coin, bien qu'aucun rayon minimum ne soit indiqué.

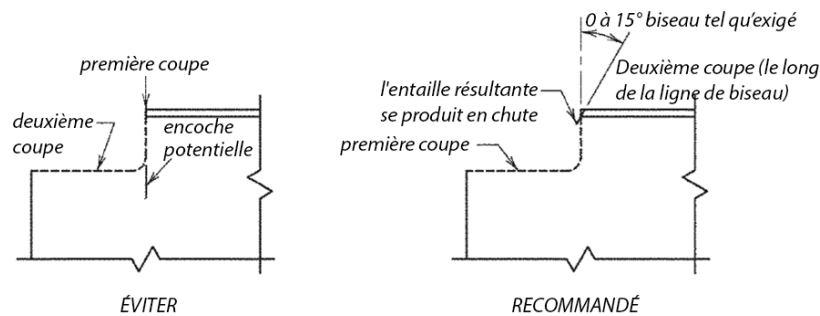
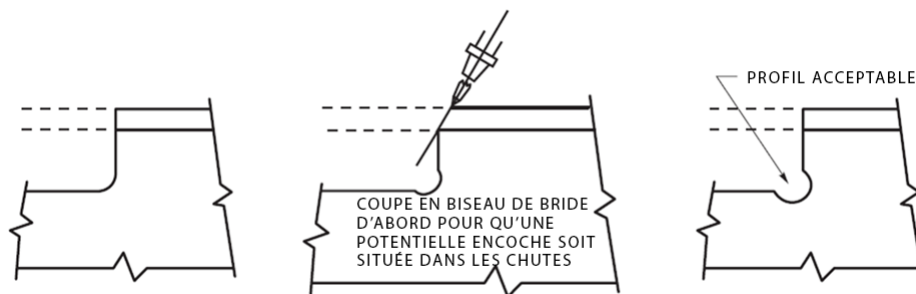


Fig. 9.9 Pratiques d'adaptation recommandées.

Avec l'aimable autorisation de l'Institut américain de la construction en acier, Manuel de la construction en acier  
Figure 9-10

#### Figure 4. Manuel de construction en acier AISC Figure 9-10

D'autre part, les exemples de bonnes pratiques de découpe de chapes de la figure C-5.2 de la norme AWS D1.1/D1.1M:2015 illustrent le découpage de la bride en premier sur un biseau plus net pour réduire le risque d'encoche, car davantage de matériau de bande doit être coupé pour atteindre l'emplacement de la bande de poutre horizontale. Cette figure montre également l'utilisation d'une intersection de grand rayon entre la coupe de la bride et la coupe de la bande, ce qui est particulièrement utile lors de la réparation d'une entaille laissée par la coupe (voir Figure 5).



Avec l'aimable autorisation de l'American Welding Society, AWS D1.1/D1.1M:2015 Figure C-5.2

#### Figure 5. AWS D1.1/D1.1M:2015, Figure C-5.2

La Figure 6 montre les résultats d'une mauvaise pratique et d'une mauvaise technique lors de la coupe d'une chape de poutre à l'oxycoupage.





Figure 6. Mauvaises pratiques en matière de coupe de chape

Les coupes de mauvaise qualité de la Figure 6 peuvent être comparées à celles de la coupe de chape contrôlée de la Figure 7, réalisée à l'aide d'un découpage plasma amélioré à commande numérique. Un autre avantage d'un tel découpage contrôlé est que la profondeur de la chape de poutre peut être minimisée, maintenant ainsi la profondeur maximale du matériau de la bande pour la résistance, réduisant ainsi le besoin de bandes renforcées et maintenant les distances désirées des bords des trous de boulons.



Figure 7. Découpage contrôlé de chape de poutre

### **Normes américaines**

Pour les chapes de poutre, AISC 360-16 définit les exigences générales relatives aux bords coupés thermiquement et aux coins rentrants décrites dans les sections précédentes, avec deux ajouts :

- 1) Pour les formes laminées avec une épaisseur de bride ne dépassant pas 50 mm (2 po), la rugosité de surface maximale ne doit pas dépasser 2 000  $\mu$ po (50  $\mu$ m) (AWS C4.1 Exemple 2).
- 2) Pour les formes laminées avec une épaisseur de bride supérieure à 50 mm (2 po) et formes constituées d'éléments assemblés avec une épaisseur de matériau supérieure à 50 mm (2 po), une température de préchauffage d'au moins 66 °C (150 °F) est requise avant le découpage thermique.

L'application du préchauffage juste avant la découpe a pour but de réduire la dureté de la couche de surface.

L'article 5.15 de la norme AWS D1.1/D1.1M:2015 sur les angles rentrants exempte les chapes de poutre de l'exigence de rayon minimal de 25 mm [1 po] applicable aux autres angles rentrants. La Section M2.2 de la norme AISC 360-16 fait exception à cette disposition.

L'article 5.16.3 de la norme AWS D1.1/D1.1M:2015 sur les formes lourdes, concernant les chapes de poutre utilisées aux épissures des éléments soudés, la surface coupée de la chape de poutre doit être meulée au métal brillant et inspectée par méthodes de test par magnétisation (MT) ou par ressuage (PT) avant le dépôt des soudures d'épissure. Cette exigence n'est pas spécifiée pour les chapes de poutre dans AISC 360-16. Dans les formes autres que les formes lourdes et pour les emplacements autres que les épissures des éléments, les chapes ne doivent pas être meulées ni inspectées par les méthodes PT ou MT.

Pour les éléments chargés cycliquement, la norme AISC 360-16, Annexe 3, fournit deux dimensions de rayon, chacune avec une catégorie de fatigue différente (voir AISC 360-16, Tableau A-3.1, Exemple 1.3). Les chapes de rayon égal ou supérieur à 25 mm [1 po], base de métal brillant, se voient attribuer une catégorie de fatigue C, tandis qu'un rayon égal ou supérieur à 10 mm [3/8 po] est un détail de catégorie E'. Dans le cas du détail de catégorie E', la surface de coupe n'a pas besoin d'être meulée et la rugosité maximale de la surface est de 1 000  $\mu$ po (25  $\mu$ m), AWS C4.1 Exemple 3.

## **Normes canadiennes**

La norme CSA S16-14 ne contient aucun critère spécifique pour les chapes de poutre, sauf pour les applications à charge cyclique (fatigue). La norme CSA W59-18, Section 5.3.7, sur les chapes de poutre et les trous d'accès aux soudures exige que les rayons des chapes de poutre assurent une transition en douceur, sans entailles ni coupures au-delà des points de tangence. La rugosité de la surface doit répondre aux mêmes critères que ceux des bords libres.

Le Tableau 9 de la norme CSA S16-14 indique, pour les éléments à charge cyclique, la catégorie de détail E1 pour les angles rentrants des chapes d'un rayon [1-3/8 po] de 35 mm ou plus qui sont meulées.

## **Normes européennes**

La norme EN 1090-2:2018 ne contient aucune exigence spécifique supplémentaire pour les chapes de poutre. Le terme « chape » est utilisé dans la norme, mais il s'applique à un détail entre la nervure et les traverses utilisé pour les plaques de pont à dalle orthotrope.

## **Normes australiennes et néo-zélandaises**

Le Tableau F2.2 de la norme AS.NZS 5131:2016, Éléments de fabrication des composants et des éléments, contient une tolérance pour l'exactitude des chapes de poutre des éléments, y compris la profondeur et la longueur de la face. Il n'y a pas de limites pour les « tolérances essentielles », autres que celles nécessaires pour satisfaire les hypothèses de conception de la structure en termes de capacité de conception et de stabilité. Pour les « tolérances fonctionnelles » nécessaires au montage et à l'apparence, pour la classe 1, la condition par défaut (typique des catégories de construction 1 et 2), la tolérance de profondeur et de longueur de la chape est de +0, -3 mm. Pour la classe 2, recommandée mais non requise pour les catégories de construction 3 et 4, la tolérance sur la profondeur et la longueur de la chape est de +0, -2 mm.

## **Normes japonaises**

JASS 6 (2007) ne contient pas d'exigences relatives aux opérations de découpe thermique allant au-delà des exigences de découpe thermique générales discutées précédemment.

## **Trous d'accès aux soudures**

Les trous d'accès aux soudures doivent fournir un accès adéquat pour permettre des soudures de qualité sur toute la bride d'une section de poutre ou de colonne, en minimisant les interférences de la bande. On sait que de petits trous d'accès aux soudures ou des trous manquants contribuent à des défauts de soudure importants près de l'intersection bride/bande.

## **Normes américaines**

La Section J1.6 AISC 360-16 sur les trous d'accès aux soudures énumère dix exigences, y compris celle précisant que

- ▶ les trous d'accès doivent être exempts d'entailles et de coins rentrants tranchants (rubrique e),
- ▶ les trous doivent avoir un rayon de 10 mm [3/8 po] ou plus (rubrique f), et
- ▶ pour les formes lourdes, la surface de coupe doit être meulée jusqu'au métal brillant (rubrique i).

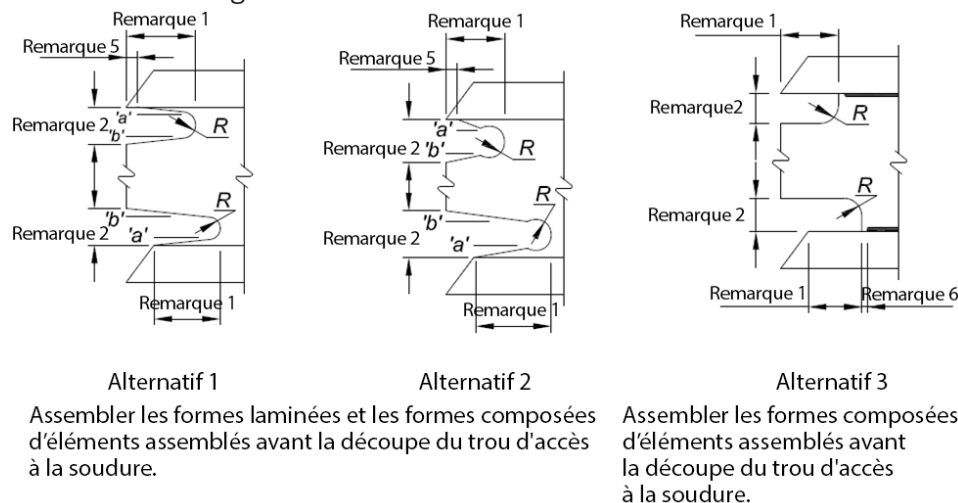
Pour les trous d'accès aux soudures dans les formes ayant une épaisseur de rebord inférieure ou égale à 50 mm (2 po), la rugosité de surface du bord coupé thermiquement est limitée à 2 000 µpo au maximum [50 µm].

Les Sections A3.1 (c) et (d) de la norme AISC 360-16 définissent les formes lourdes comme étant des formes laminées à chaud avec des épaisseurs de bride supérieures à 50 mm (2 po) et les formes constituées d'éléments assemblés avec des plaques supérieures à 2 pouces [50 mm]. Pour ces plaques et formes lourdes, la section M2.2 requiert une température de préchauffage minimale de 66 °C [150 °F] avant la découpe thermique. Une fois que les trous d'accès ou les chapes ont été découpé(e)s sur les formes lourdes, la surface doit être meulée jusqu'au métal brillant.

Pour répondre à ces exigences lors de l'utilisation d'un PythonX, l'acier peut être préchauffé manuellement avant la découpe ; après découpe, les trous d'accès peuvent être meulés manuellement en métal brillant.

Une considération supplémentaire doit être prise lorsque des découpes thermiques sont utilisées sur des éléments qui seront galvanisés à chaud. Des mesures peuvent être prises pour atténuer la fissuration assistée par un métal liquide (LMAC, également connue sous le nom de fragilisation par un métal liquide, LME).

Dans les commentaires sur la norme AISC 360-16, Fig. C-J1.2. sur la géométrie des trous d'accès aux soudures, les détails typiques des trous d'accès aux soudures pour les joints poutre-colonne sont fournis, comme illustré à la Figure 8.



Remarques : Ce sont des détails typiques pour les joints soudés d'un côté contre un support en acier. Des détails alternatifs sont discutés dans le commentaire.

1. Longueur : supérieure à  $1,5 t_w$  ou 1-1/2 po (38 mm)
2. Hauteur : supérieure à  $1,0 t_w$  ou 3/4 po (19 mm) mais ne doit pas dépasser 2 po (50 mm)
3. R : 3/8 po min. (10 mm). Meulez les surfaces coupées thermiquement des trous d'accès aux soudures des formes lourdes, comme indiqué aux Sections A3.1 (c) et (d).
4. La pente « a » forme une transition de la bande à la bride. La pente « b » peut être horizontale.
5. Le bas de la bride supérieure doit être profilé pour permettre l'ajustement serré des barres d'appui là où elles doivent être utilisées.
6. La soudure de la bande à la bride des éléments assemblés doit être maintenue à une distance d'au moins la taille de la soudure par rapport au bord du trou d'accès.

Avec l'aimable autorisation de l'Institut américain de la construction en acier AISC 360-16, Figure C-J1.2

**Figure 8. AISC 360-16 géométrie des trous d'accès aux soudures**

L'article 5.14.8 de la norme AWS D1.1/D1.1M:2015 autorise la découpe au plasma d'un matériau « ... à utiliser dans la préparation, la découpe ou le rognage de matériaux ». L'article 5.16 traite de la forme et des dimensions des trous d'accès aux soudures. Cet article, à l'instar d'autres articles de code, interdit les entailles. Les trous d'accès aux soudures doivent permettre une transition en douceur. La

Figure 5.2 de la norme AWS D1.1/D1.1M:2015, illustrée à la Figure 9, montre les différentes géométries autorisées pour les trous d'accès aux soudures.

Reproduit avec l'aimable autorisation de l'American Welding Society. AWS D1.1/D1.1M:2015, Figure 5.2

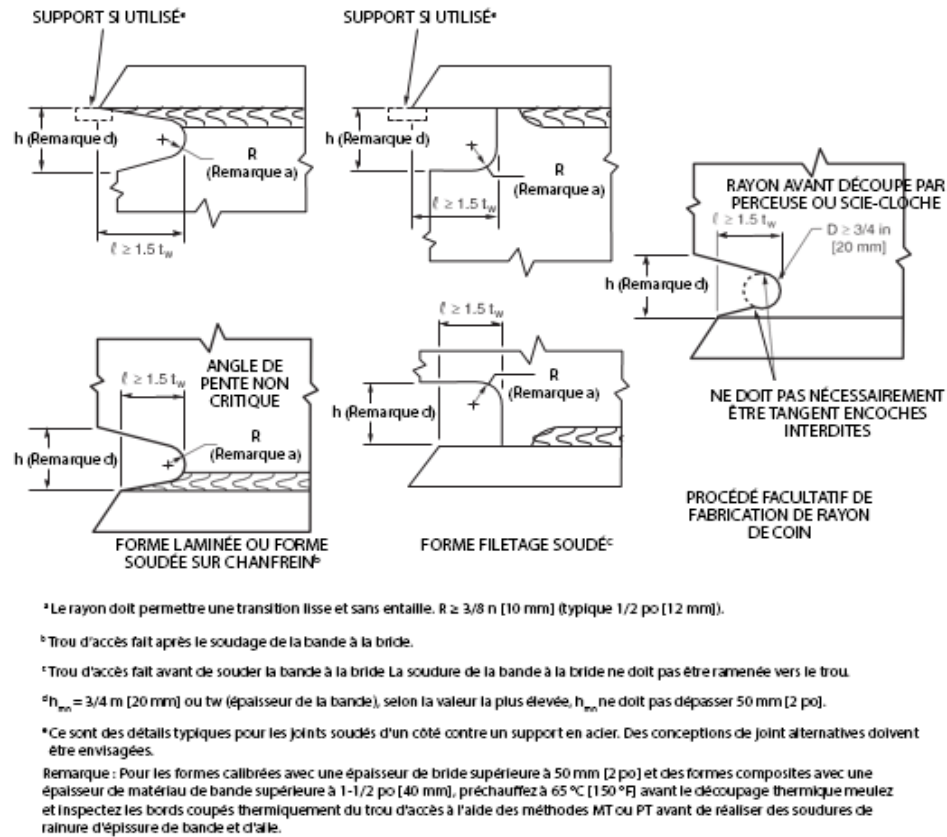


Figure 5.2 - Géométrie du trou d'accès à la soudure (voir 5.16.1.2)

Figure 9. AWS D1.1/D1.1M:2015 géométries des trous d'accès aux soudures

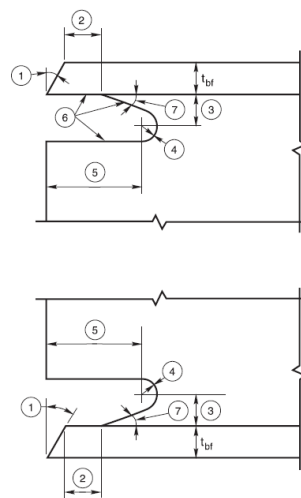
Conformément à l'article 5.16.3 de la norme AWS D1.1/D1.1M:2015, une température de préchauffage de 65 °C (150 °F) doit être utilisée lorsque des trous d'accès vont être découpés dans des formes épaisses, définies comme des formes laminées avec des brides supérieures à 50 mm [2 po] et des sections soudées avec des plaques supérieures à 50 mm [2 po]. La surface de coupe doit également être meulée jusqu'au métal brillant et inspectée avec la méthode MT ou PT. Cette exigence ne s'étend pas à d'autres formes, telles que celles composées de matériaux plus minces.

Pour répondre à ces exigences lors de l'utilisation d'un PythonX, l'acier peut être préchauffé manuellement avant la découpe ; après découpe, les trous d'accès peuvent être meulés manuellement en métal brillant.



Pour les fortes charges sismiques, la norme AISC 341-16, Section A4.2(1), exige que les dessins de conception et les spécifications de construction indiquent la forme du trou d'accès à la soudure si une forme autre que celle prescrite dans la norme AISC 360-16 doit être utilisée. Le commentaire de la Section A4.2(1) explique que « les analyses et les recherches concernant l'utilisation des trous d'accès aux soudures ont montré que la forme du trou d'accès à la soudure peut avoir un effet significatif sur le comportement des assemblages à moment. » Les systèmes OMF (Ordinary Moment Frame) exigent que la forme et les dimensions du trou d'accès aux soudures soient conformes à AWS D1.8. La Section J6.2d de la norme AISC 341-16 requiert également le contrôle par magnétisation ou par ressuage dans les trous découpés thermiquement et les trous d'accès lorsque l'épaisseur de la bride dépasse 38 mm (1-1/2 po).

La norme AWS D1.8:2016 ne traite pas directement du processus avec lequel un trou d'accès peut être créé, mais parce que AWS D1.8 est un complément à AWS D1.1, l'article 5.14.8 s'applique donc à AWS D1.1/D1.1M:2015 et le découpage plasma est donc autorisé. L'article 6.11.1 de la norme AWS D1.8 contient une option supplémentaire de trou d'accès aux soudures que le maître d'œuvre peut utiliser à la place des géométries contenues dans AWS D1.1/D1.1M:2015 ou AISC 360. Une réimpression de la Figure 6.2 de la norme AWS D1.8 illustre cette option (voir la Figure 10).



Remarque :  
 1. Biseau tel que requis pour le WPS.  
 2.  $t_w$  ou 1/2 po [12 mm], selon la valeur la plus grande (+1/2  $t_w$  ou -1/4  $t_w$ ).  
 3. La dimension minimale doit être de 3/4  $t_w$  ou de 3/4 po [20 mm], selon la valeur la plus grande. La dimension maximale doit être de  $t_w$  (+1/4 po [6 mm]).  
 4. Rayon minimum de 3/8 po [10 mm] (-0, + illimité).  
 5. 3  $t_w$  ( $\pm 1/2$  po [12 mm]).  
 6. Voir 6.11.2.1 pour les exigences de rugosité de surface.  
 7. Les tolérances ne doivent pas s'accumuler dans la mesure où l'angle du trou d'accès coupé avec la surface de la bride dépasse 25°.

Figure 6.2 - Géométrie alternative - Détail du trou d'accès à la soudure de la bride de la poutre (voir 6.11.1.2)

Reproduit avec l'aimable autorisation de l'American Welding Society, AWS D1.8/D1.8M:2016 Figure 6.2

Figure 10. AWS D1.8 géométrie alternative du trou d'accès à la soudure

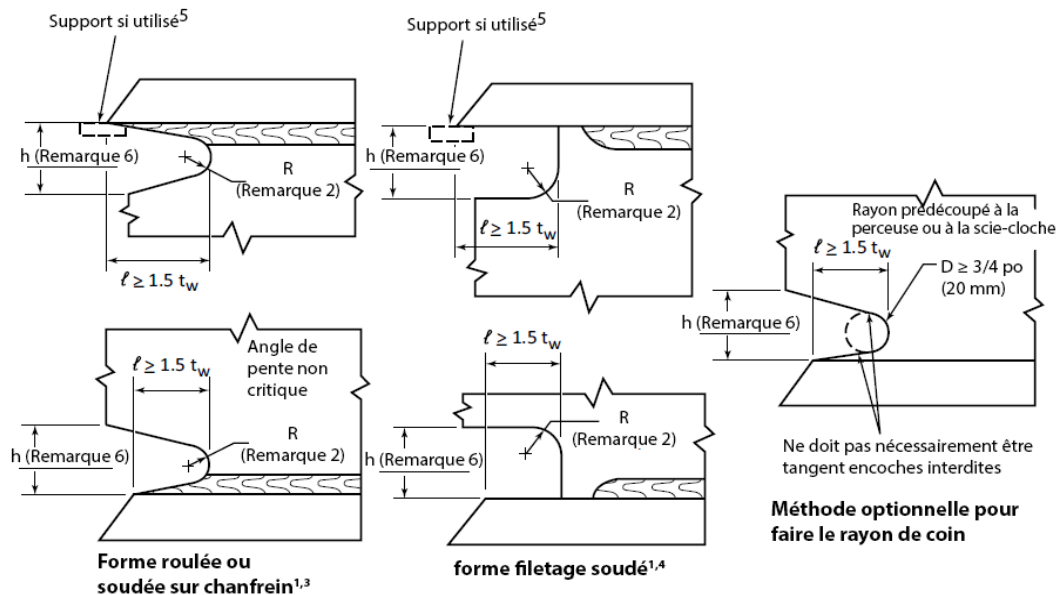
L'article 6.11.2 de la norme AWS D1.8 sur les exigences de qualité pour les trous d'accès aux soudures requiert un fini de surface inférieur à 500  $\mu$ po [13  $\mu$ m] à l'exception des trous d'accès qui doivent uniquement être conformes à la géométrie de la norme AWS D1.1. L'exemple 4 de la norme AWS C4.1 peut être utilisé comme guide pour une rugosité de surface de 500  $\mu$ po [13  $\mu$ m]. Les articles 6.11.2.2 et 6.11.2.3 permettent le meulage pour enlever des gouges sur une pente de 1:5 au plus ou, dans la partie incurvée du trou d'accès à la soudure, dans un rayon d'au moins 3/8 po [10 mm]. Les grandes entailles qui ne peuvent pas être réparées par meulage peuvent être réparées par soudage, à condition que le préchauffage approprié et une procédure de soudage de réparation soient suivis. Après réparation par soudure, toute la zone doit être rectifiée pour obtenir un fini lisse.

### **Normes canadiennes**

L'article 5.3.7 de la norme CSA W59-18 Passages de poutre et trous d'accès à la aux soudures exige que la surface de coupe des trous d'accès à la aux soudures soit exempte d'entailles ou de rainures, le rayon permet une transition en douceur et doit répondre aux exigences de surface de l'article 5.3.3, les critères utilisés pour les bords libres. De plus, l'article 5.3.8 sur les dimensions des trous d'accès aux soudures réitère l'obligation qu'elle soit exempte d'encoches et ajoute une exigence selon laquelle ils doivent être exempts de coins rentrants tranchants, sauf lorsque des soudures de la bande à la bride de flanc de raccordement sont utilisées dans les formes constituées d'éléments assemblés, les trous d'accès pouvant alors se terminer perpendiculairement à la bride. Dans ce cas, les soudures de flanc de raccordement ne doivent pas être renvoyées par le trou d'accès à la soudure.

Les dimensions des trous d'accès aux soudures sont indiquées à la Figure 11.

**Figure 5.1**  
**Dimensions du trou d'accès à la soudure**  
(Voir Article 5.3.8)



**Remarques :**

- 1) Pour les formes ASTM A6 A6M et CSA G40.20 des groupes 4 et 5 et des assemblages composites soudés avec une épaisseur de bande supérieure à 38 mm (1-1/2 po), préchauffez à 65 °C (ISO °F) avant la découpe thermique, meulez et inspectez les bords du trou d'accès coupés thermiquement à l'aide de méthodes de contrôle par magnétisation ou de ressuage avant de réaliser des soudures d'épaisseur de bandes et d'aile.
- 2) Le rayon doit permettre une transition lisse sans entaille;  $R \geq 10$  mm (3/8 po) [typique 12 mm (1/2 po)].
- 3) Ouverture d'accès réalisée après le soudage de la bande sur la bride.
- 4) Ouverture d'accès faite avant de souder la bande à la bride. La soudure n'est pas revenue par l'ouverture.
- 5) Ce sont des détails typiques pour les joints soudés d'un côté contre un support en acier. Des conceptions de joint alternatives doivent être envisagées.
- 6)  $h_{min} = 20$  mm (3/4 po) ou  $t_w$  (épaisseur de la bande), selon la valeur la plus grande.

Avec l'aimable autorisation de l'Association canadienne de normalisation CSA W59-18, Figure 5.1

**Figure 11. CSA W59-18 Géométrie du trou d'accès de la soudure**

L'article 5.3.9 de la norme CSA W59-18 traite des formes des groupes 4 et 5 et indique que CSA G40.20 et ASTM A6/A6M, s'agissant des formes constituées d'éléments assemblés et des constructions appartenant aux groupes 4 et 5 et dont le matériau en bande a une épaisseur supérieure à 38 mm [1-1/2 po], on devra meuler jusqu'au polissage et inspecter à l'aide de tests par magnétisation ou par ressuage les bords coupés thermiquement. Cette exigence de meulage et d'inspection ne s'applique pas aux trous d'accès aux soudures d'autres formes.

## **Normes européennes**

La norme EN 1090-2:2018 ne contient aucune exigence relative aux trous d'accès aux soudures qui aille au-delà des exigences de découpage thermique générales décrites précédemment.

## **Normes australiennes et néo-zélandaises**

AS/NZS 5131:2016, AS 4100-1998 (R2016) et NZS 3404.1 (2007) ne contiennent aucune exigence relative aux trous d'accès aux soudures qui aille au-delà des exigences de découpage thermique générales décrites précédemment.

## **Normes japonaises**

Les normes japonaises qualifient les trous d'accès aux soudures de « coquilles ». En vertu de l'article 4.5 de JASS 6 sur les coquilles, lorsque aucune Note spéciale n'est fournie, les coquilles doivent être conformes à des exigences dimensionnelles spécifiques. Le rayon total du trou d'accès doit être d'environ 35 mm [1-3/8 po] et le plus petit rayon de la pointe du trou d'accès doit être égal ou supérieur à 10 mm [3/8 po]. Les Notes spéciales sont des documents contractuels qui peuvent fournir des exigences alternatives ou supplémentaires pour la préparation ou les dimensions de la coquille.

Les coquilles peuvent être découpées à l'aide d'une fraiseuse ou d'un « chalumeau pour oxycoupage avec accessoire ». Si vous utilisez un oxycoupage manuel au gaz, la surface de coupe doit être meulée et lisse. Ailleurs dans JASS 6, il est fait explicitement référence au découpage plasma. Le découpage plasma n'étant pas explicitement indiqué comme un processus acceptable pour les coquilles, l'utilisateur de ce Guide devra consulter l'ingénieur responsable du dossier ou une autre autorité technique responsable du projet et demander que le découpage plasma soit autorisé au lieu de l'oxycoupage au gaz.

## **Coupe des sections de poutre réduites**

Les sections de poutre réduite, également connues sous le nom de RBS et « dogbones », sont des brides de poutre spécialement découpées utilisées dans des armatures résistantes à des moments sismiques spécifiques. La RBS est l'un des assemblages dont le statut est pré-qualifié en tant qu'assemblage à moment dans AISC 358-16. Les RBS sont également utilisées dans certaines applications pour améliorer la ductilité des éléments et des assemblages pour les charges explosives lorsque des assemblages antisismiques ont été sélectionnés à cet effet.



Figure 12. Exemple de bord coupé de RBS

L'ensemble du système est décrit dans le chapitre 5 sur les assemblages à moment de poutre à section réduite (RBS) de AISC 358-16, et la Figure 5.1 de la norme illustrant les détails de la Figure 13.

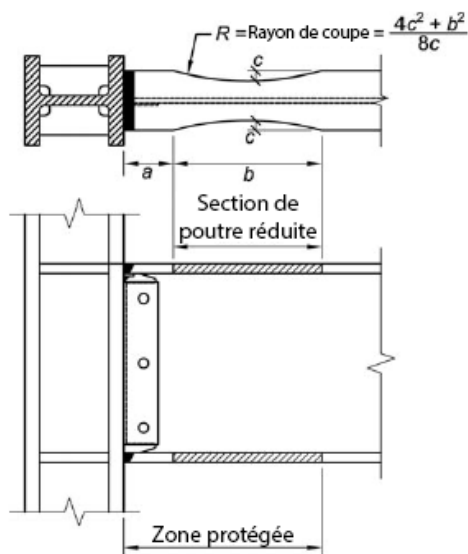


Fig. 5.1 assemblage de sections de poutre réduite.

Avec l'aimable autorisation de l'Institut américain de la construction en acier AISC 358-16 Fig. 5.1

Figure 13. Détail de l'assemblage des RBS

La Section 5.7 FAISC 358-16 sur la fabrication de coupes de bride fournit les exigences détaillées, y compris un profil Ra de rugosité de surface maximale de 500  $\mu\text{po}$  [13  $\mu\text{m}$ ], des limitations en terme de gouges et les tolérances en terme de précision des dimensions de coupe.



## Fatigue et découpage plasma

La conception des éléments dont les bords sont découpés thermiquement a été prise en compte dans les principales normes de construction en acier. Les termes spécifiques utilisés dans ces normes varient, mais les considérations sont les mêmes, qu'il s'agisse de couper à l'oxycoupage, au plasma ou tout autre procédé de découpage thermique, la distinction étant faite dans certaines normes mais pas dans toutes.

### American Institute of Steel Construction

#### Bords découpés thermiquement

Pour la fatigue des bâtiments et autres structures similaires, la Section 3.5 de la norme AISC 360-16, Annexe 3 Fatigue, sur les exigences de fabrication et de montage en termes de fatigue exige que « la rugosité de surface des bords coupés thermiquement soumis à des contraintes cycliques, qui incluent la tension, ne doit pas dépasser 1 000  $\mu\text{po}$  [25  $\mu\text{m}$ ]. » La norme ASME B46.1 sur la texture de la surface (rugosité, ondulation et dépôt de la surface) est indiquée comme norme de référence pour la mesure de la rugosité de surface, mais l'exemple 3 de la norme AWS C4.1 est couramment utilisé pour évaluer que la valeur de la rugosité de surface est respectée.

Le Tableau A-3.1 de l'Annexe 3 sur les paramètres de conception antifatigue, utilise le terme ancien « bords coupés à la flamme » plutôt que sur les bords découpés thermiquement, mais un autre texte dans la spécification et l'annexe semble indiquer que les bords découpés au plasma sont inclus avec « bords coupés au feu ». Dans la Section 1 sur les matériaux lisses loin de toute soudure, la rubrique 1.1 attribue la catégorie de contrainte A au métal de base sans coins rentrants, à l'exception de l'acier patinable non revêtu, avec des bords « coupés à la flamme » avec une rugosité de surface égale ou inférieure à 25  $\mu\text{m}$  [1 000  $\mu\text{po}$ ], la même catégorie de contrainte que les surfaces nettoyées ou laminées. Si le métal de base est de l'acier patinable non revêtu, la catégorie de contrainte est B, conformément à la rubrique 1.2. Voir Figure 14.

Pour les structures de ponts routiers, les spécifications de conception du pont AASHTO LRFD section 6, Structures en acier, doivent être utilisées plutôt que AISC. Pour les structures de ponts ferroviaires, il convient d'utiliser le Chapitre 15 sur les structures en acier du *Manuel AREMA pour l'ingénierie ferroviaire*. AASHTO et AREMA utilisent tous deux le terme « coupe à la flamme » plutôt que découpe thermique.

Le Tableau 9 contient les recommandations de recherches menées par Hobbacher (Hobbacher, 2016) et Garcia et Cicero (Garcia et Cicero, 2016) sur les valeurs de calcul de conception antifatigue pour les bords coupés au plasma pour les spécifications AASHTO. Ces recommandations suggèrent de réduire la catégorie de stress A mentionnée ci-dessus à la catégorie de stress B ou B'.

TABLEAU 9. RECOMMANDATIONS DE HOBACHER, DE GARCIA ET DE CICERO

|                                                                                               | Catégorie actuelle | Catégorie proposée |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Bords coupés au chalumeau [oxycoupage]<br>Rugosité de surface de 25,4 µm [1 000 µpo] ou moins | A                  |                    |
| Bords coupés au chalumeau [oxycoupage]<br>Rugosité de surface de 45 µm [1 780 µpo] ou moins   |                    | B'                 |
| Bords découpés au plasma<br>Épaisseur 25 mm [1 po] ou moins, Rz5 ≤ 10 µm                      |                    | B                  |

### **Coins rentrants, trous d'accès aux soudures et chapes de poutres**

Pour les applications en fatigue, l'Annexe 3 de la Section 3.5 de la norme AISC 360-16 permet de découper thermiquement les trous d'accès aux soudures : « Les coins rentrants au niveau des coupes, des chapes et des trous d'accès aux soudures doivent former un rayon d'au moins le rayon prescrit du Tableau A-3.1 en préperforant ou en sous-poinçonnant et en alésant un trou ou en effectuant une découpe thermique pour former le rayon de la coupe. » Le commentaire sur l'Annexe 3.5 aborde la justification de l'exigence de 1 000 po [25 µm] :

« Des études expérimentales sur des poutres composées de plusieurs éléments soudés ont démontré que, si la rugosité de surface des bords coupés à la flamme était inférieure à 1 000 µpo [25 µm], les fissures de fatigue ne se développeraient pas à partir du bord découpé au chalumeau, mais à partir des soudures d'angle longitudinales reliant les brides à la bande (Fisher et al., 1970, 1974). Cela signifie une résistance à la fatigue de catégorie B, sans contrainte de meulage des bords coupés à la flamme. »

En outre, les coins rentrants au niveau des coupes et des chapes, y compris les obstructions et autres discontinuités géométriques, qu'elles soient réalisées par découpage thermique ou par un autre moyen, doivent avoir un rayon égal au rayon prescrit dans AISC 360-16 Annexe 3, Tableau A-3.1. Pour la catégorie de contrainte C, le rayon doit être au moins égal à 25 mm [1 po] et la surface de coupe thermique doit être meulée jusqu'au métal brillant. Sans meulage jusqu'au métal brillant, la catégorie de contrainte est E', avec un rayon minimal de 10 mm [3/8 po] autorisé dans ce cas (voir la rubrique 1.3). Les mêmes dispositions s'appliquent aux trous d'accès aux soudures conformes à la Section J1.6 dans les formes laminées (voir la rubrique 1.4). Toutefois, si le trou d'accès à la soudure est utilisé dans des éléments composites plutôt que dans des formes laminées, la catégorie de contrainte D est utilisée à la place de la catégorie de contrainte C (voir la rubrique 3.3).

Il convient de noter que le Tableau A-3.1, Section 6 sur le métal de base au niveau des assemblages transversaux soudés, préconise le meulage de l'extrémité soudée et que le meulage du bord coupé thermiquement de la fixation n'est pas requis (voir les rubriques 6.1 à 6.4). De même, pour la rubrique 7.2 de la Section 7, sur les fixations courtes en métal de base, seule l'extrémité à souder doit être meulée.

## **Trous de boulons**

La tolérance des trous de boulons coupés thermiquement pour les applications à charge cyclique, régies par le RCSC, a déjà été abordée (voir pages 21-22).

AISC 360-16, Annexe 3 Fatigue, Tableau A-3.1 sur les paramètres de conception antifatigue traite des assemblages boulonnés dans la Section 2 sur les matériaux assemblés dans des joints serrés mécaniquement. Lorsque des boulons à haute résistance sont utilisés et précontraints, avec des surfaces de contact préparées pour fournir une résistance au glissement de classe A ou B, la catégorie de contrainte B est utilisée pour le métal de base autour du trou de boulon (voir rubriques 2.1 et 2.2). Cette condition inclut les trous de boulons découpés au plasma qui sont conformes aux exigences AISC pour les trous coupés thermiquement (AISC 360-16, Section M2.5).

Si le boulon est précontraint, mais que la surface de contact n'est pas préparée pour une résistance au glissement de classe A ou B et que le trou est percé ou alésé, la catégorie de contrainte C est utilisée (voir la rubrique 1.5).

Si le trou est percé ou alésé et qu'aucun boulon n'est placé dans le trou, la catégorie de contrainte D est utilisée (voir la rubrique 1.5).

Si le boulon n'est installé que dans des conditions de bon serrage, la note des figures correspondant à la rubrique 2.3 indique que la catégorie de contrainte C peut être utilisée, bien qu'elle fut à l'origine utilisée pour les joints rivés. Seuls les joints rivetés sont inclus dans la description écrite de la rubrique 2.3. L'inclusion de joints bien serrés, sans dispositions quant à la méthode de perçage, en tant que catégorie de contrainte C, comme pour les boulons précontraints dans les trous percés ou alésés, semble non prudente. Jusqu'à ce que ce sujet soit résolu, il est suggéré qu'un assemblage avec un boulon qui est simplement bien serré soit considéré comme :

- 1) un trou ouvert similaire aux trous de barre à œil de la rubrique 2.4 et que la catégorie de contrainte E soit utilisée, ou
- 2) une discontinuité géométrique de rayon supérieur à 3/8 po [10 mm] qui n'a pas été meulée (alésée) jusqu'au métal brillant, tel que décrit à la rubrique 1.3, et que la catégorie de contrainte E' soit utilisée.

Cette dernière recommandation est en accord avec les recommandations de la recherche utilisant des tôles épaisses de 1/2 po [12,7 mm] (non publiées à la date de cette publication) d'utiliser la classe de contrainte E' pour les boulons sans précontrainte dans les joints à cisaillement réalisés utilisant des trous de boulons découpés au plasma haute définition. Comme indiqué ci-dessous, d'autres recherches ont recommandé la catégorie de stress E pour cette condition.

Pour les structures de ponts routiers, les spécifications de conception du pont AASHTO LRFD section 6, *Structures en acier*, doivent être utilisées plutôt que AISC. Des recherches menées par Garcia et Cicero (Garcia et Cicero, 2016) ont recommandé les valeurs de calcul de fatigue indiquées dans le Tableau 10 pour les trous de boulons découpés thermiquement pour les spécifications AASHTO. mais il faut noter que ces valeurs sont pour des trous ouverts sans boulons et seraient applicables aux trous ouverts et aux assemblages avec des boulons qui ne sont pas précontraints.

**TABLEAU 10. CATÉGORIES DE FATIGUE RECOMMANDÉES POUR LES TROUS OUVERTS ET POUR LES TROUS AVEC BOULONS BIEN SERRÉS**

|                                                                           | Catégorie actuelle | Catégorie proposée       |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------|
| Trous percés ou poinçonnés et alésés                                      | D                  | Aucun changement proposé |
| Trous coupés au chalumeau (oxycoupage)<br>Épaisseur 25 mm [1 po] ou moins | Non traité         | C                        |
| Trous découpés au plasma<br>Épaisseur 25 mm [1 po] ou moins               | Non traité         | E                        |

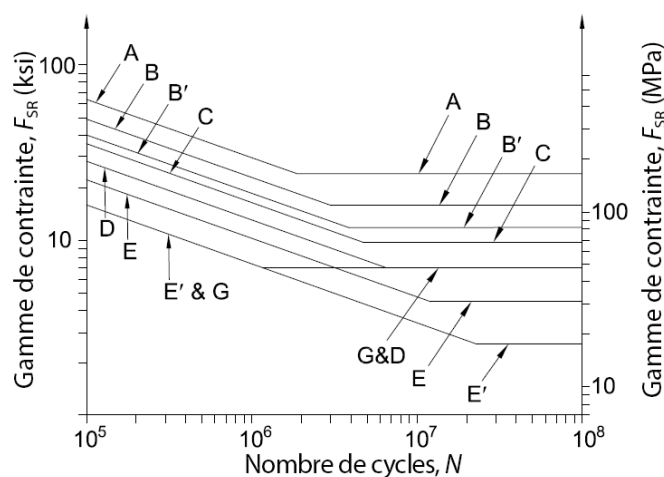


Fig. C-A-3.1 Courbes de résistance à la fatigue.

Avec l'aimable autorisation de l'Institut américain de la construction en acier AISC 358-16 Fig. C-A-3.1.

**Figure 14. AISC 360 Courbes de fatigue**

## Canada

### Bords découpés thermiquement

CSA S16-14, article 26 Fatigue, définit les exigences en matière de fatigue. Le Tableau 9 de CSA S16 sur les catégories de détails pour la fatigue induite par la charge, fournit des catégories de détails équivalentes aux catégories de contraintes utilisées dans AISC. Pour les bords de coupe thermique, les classifications sont identiques à celles de la norme AISC.

## Trous de boulons

Le paragraphe 28.4.3 de la norme CSA S16-14 sur les trous découpés thermiquement, limite les trous découpés thermiquement aux structures chargées statiquement. Les trous tranchés au plasma ne peuvent donc pas être utilisés pour des applications de conception antifatigue. Dans les applications de conception antifatigue, les trous peuvent être poinçonnés (dans les limites), sous-poinçonnés, sous-perçés et alésés ou percés conformément au paragraphe 28.4.1 sur les trous percés et poinçonnés.

## Europe

### Bords découpés thermiquement

Eurocode 3, EN 1993, *Conception des structures en acier*, Partie 1-9 : Fatigue, fournit ce que l'on appelle les « catégories de détails », souvent appelées catégories FAT, abrégé de catégories de fatigue. Plus la valeur est élevée (basée sur la plage de contrainte autorisée (en MPa) à 2 000 000 de cycles), plus la plage de contrainte autorisée est grande.

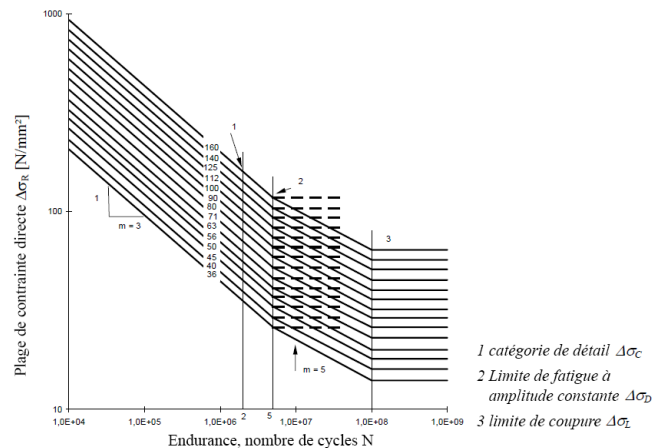


Figure 7.1 : Courbes de résistance à la fatigue pour les plages de contraintes directes

Avec l'aimable autorisation de l'EN 1993-1-9:2005 Figure 7.1

Figure 15. EN 1993-1-9:2005 Courbes de fatigue

Il existe deux catégories FAT pour les bords découpés au gaz à la machine :

- FAT140 : Matériau dont les bords découpés au gaz à la machine ont des stries de coupe régulières et peu profondes, avec tous les signes visibles de discontinuité des bords supprimés. Les zones de découpe doivent être usinées ou meulées et toutes les bavures doivent être éliminées. Les éraflures d'usinage, résultant par exemple d'opérations de meulage, ne peuvent être que parallèles aux contraintes. Les coins rentrants doivent être améliorés par meulage (pente  $\leq 1/4$ ) ou évalués. Si acier patinable, rétrogradez à FAT125.
- FAT125 : Matériau avec des bords coupés au gaz à la machine ayant des stries de coupe peu profondes et régulières ou un matériau coupé au gaz à la main, pansé ensuite pour éliminer toutes les discontinuités des bords. Coupés au gaz à la machine avec une qualité de coupe conforme à EN 1090. Les coins rentrants doivent être améliorés par meulage (pente  $\leq 1/4$ ) ou évalués. Si acier patinable, rétrogradez à FAT112.

À titre de comparaison, FAT160 comprend des produits laminés et extrudés comprenant des plaques et des méplats, des profilés laminés et des profilés creux sans soudure, rectangulaires ou circulaires. Les bords à vif, les défauts de surface et de roulement doivent être améliorés par meulage jusqu'à élimination et qu'une transition en douceur soit obtenue.

Les fixations soudées dans lesquelles un rayon est coupé pour que les contraintes passent dans la fixation, de façon similaire à AISC 360-16 Tableau A-3.1 Section 6, sont illustrées dans EN 1993 : Tableau 8.4 Fixations et raidisseurs de soudure. Les valeurs vont de FAT90 à FAT50, en fonction des caractéristiques dimensionnelles et du type de soudure. Pour ces détails, le rayon de transition sans bosses peut être obtenu en usinant ou en découpant au gaz le gousset avant le soudage, puis en meulant la zone de soudure de manière à ce que le bout de la soudure soit retiré à l'extrémité de la fixation.

Des recherches ont été entreprises en Europe pour mettre à jour les normes de conception afin d'étudier de nouvelles méthodes de découpage, notamment le découpage plasma, et pour formuler des recommandations en vue de la mise à jour et de l'intégration de ces méthodes dans les normes de conception. Les essais comprenaient le découpage plasma d'aciers de construction allant de 345 MPa [50 ksi] à 890 MPa [120 ksi], dans des épaisseurs de 15 et de 25 mm [0,59 et 1 po] (Bannister et al, 2016).

Pour les découpages plasma en ligne droite, l'étude recommande de continuer à utiliser FAT125 tel qu'elle est utilisée dans Eurocode 3. Elle ne traite pas de l'utilisation de FAT140 pour les bords découpés au plasma qui ont été finis, car l'étude s'est concentrée sur les surfaces fraîchement coupées.

L'étude recommande l'utilisation de la classe B dans la norme britannique BS 7608 du *Guide to Fatigue Design and Assessment of Steel Products (Guide de dimensionnement et d'évaluation antifatigue des produits en acier)*, pour les surfaces fraîchement découpées au plasma, une amélioration par rapport à ce qui aurait été considéré comme appartenant à la classe C. La classe B est définie comme suit : « Tous les bords découpés à la flamme sont ensuite usinés ou polis. Tous les signes visibles de stries de coupe doivent être éliminés du bord coupé à la flamme par meulage ou usinage. » La classe C est définie comme « Toute découpe des bords par rabotage ou découpage à la machine à la flamme selon une procédure contrôlée ». Il n'y a pas de classe A dans la norme.

La norme BS 7608 utilise un ensemble unique de courbes de fatigue sans coude. La classe B a une ligne S-N similaire à la catégorie de stress B dans AISC 360-16, sauf au-delà du coude AISC (Figure 16).



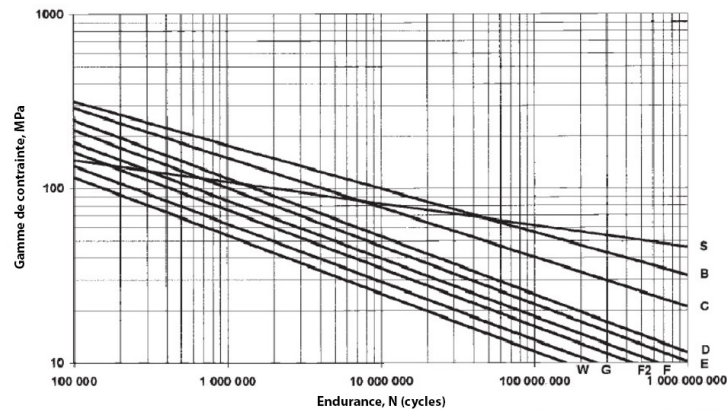


Figure 16. Courbes de fatigue de BS 7608

Les Recommandations de fatigue IIW (Hobbacher, 2016) fournissent quatre classes FAT pour les bords découpés thermiquement, deux pour la coupe à la machine et deux pour la coupe à la main :

- FAT140 Coupe au gaz à la machine ou cisailée avec pansement ultérieur, pas de fissures lors de l'inspection, pas d'imperfections visibles. Tous les signes visibles d'imperfections des bords doivent être éliminés. Les surfaces coupées à usiner ou à meuler, toutes les bavures à éliminer. Aucune réparation par remplissage de soudure. Les effets d'entaille dus à la forme des bords doivent être pris en compte.
- FAT125 Bords découpés thermiquement à la machine, coins enlevés, pas de fissures selon inspection. Les effets d'entaille dus à la forme des bords doivent être pris en compte.
- FAT100 Bords découpés thermiquement à la main, sans fissures ni entailles sévères. Les effets d'entaille dus à la forme des bords doivent être pris en compte.
- FAT80 Bords coupés thermiquement à la main, sans contrôle, pas d'encoche plus profonde que 0,5 mm. Les effets d'entaille dus à la forme des bords doivent être pris en compte.

Les recommandations de fatigue IIW incluent également les classes FAT pour les fixations soudées.

Dans la plage de durée de vie de résistance à la fatigue, les bords découpés pas oxycoupage et au plasma présentent des performances de fatigue similaires. La durée de vie de résistance à la fatigue diminue légèrement avec l'augmentation de l'épaisseur du matériau, ce qui est attribué à une probabilité statistique plus élevée d'initiation de fissures avec des matériaux plus épais. La formation de scories et les conditions du bord influent davantage sur les performances en fatigue que la rugosité de la surface coupée. Étant donné que le découpage plasma laisse un minimum de scories, le début de la fissure se produirait au niveau des bords supérieur et inférieur.

## Trous de boulons

Les trous de boulons dans les applications de conception antifatigue peuvent être réalisés à l'aide du découpage plasma, comme indiqué dans l'article 6.6.3 de la norme EN 1090-2 sur l'exécution des perforations, qui identifie les méthodes de perforation acceptables comme étant le perçage, le poinçonnage, le laser, le plasma ou autre découpe thermique, à condition que le trou réponde aux exigences de dureté locale et de qualité de la surface de coupe, conformément à l'article 6.4 sur la coupe.

La conception antifatigue des éléments avec trous de boulons est décrite dans la norme EN 1993-1-9, le Tableau 8.1. EN 1993-1-9 prend également en compte la configuration du joint boulonné dans la détermination de la classe FAT, en plus de la précontrainte des boulons (appelée pré-chargement). Aucune référence n'est faite à l'état de la surface d'appui pour la résistance au glissement.

FAT112 Joint symétrique à double revêtement avec boulons précontraints à haute résistance, vérifié sur la section brute

FAT90 Joint à double revêtement avec boulons ajustés, vérifié sur la section nette

Assemblage simple avec boulons précontraints à haute résistance, vérifié sur la section brute

Élément structurel avec trous soumis à des efforts de flexion et axiaux, vérifié sur la section nette

FAT80 Assemblage simple avec boulons ajustés, vérifié sur la section nette

FAT50 Assemblage symétrique à revêtement simple ou double avec boulons non préchargés dans les trous de passage normaux, sans inversion de charge, vérifié sur la section nette

Les recommandations de fatigue IIW n'incluent pas les classes FAT pour les trous.

Bannister et al. ont mené des études approfondies sur les trous de boulons découpés thermiquement, sans tenir compte de l'influence des boulons (Bannister et al, 2016). Pour les trous ouverts, les recommandations suivantes du Tableau 11 sont faites pour les trous de boulons découpés au plasma :

**TABLEAU 11. CATÉGORIES DE FATIGUE RECOMMANDÉES POUR LES TROUS DE BOULONS DÉCOUPÉS AU PLASMA**

|                                                                                      | BS 7608 | EN 1993-1-9 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------|
| Trous de boulons coupés au chalumeau (oxycoupage)<br>Épaisseur 25 mm [1 po] ou moins | F       | 90          |
| Trous de boulon découpés au plasma<br>Épaisseur 25 mm [1 po] ou moins                | G       | 63          |

La plupart des points d'initiation des fissures de fatigue se trouvent dans la surface de coupe ; par conséquent, le point de perçage et/ou le point de terminaison doivent être situés à l'extrémité du diamètre du trou parallèlement à la direction de la charge. Le début de la rupture de la surface découpée au plasma est différent des points d'initiation de la fissure pour les bords coupés droit, situés dans le coin supérieur ou inférieur de la surface coupée.

Dans la plage de durée de vie antifatigue, l'oxycoupage présente la meilleure performance en termes de fatigue pour les trous. Cela semble lier au chauffage thermique pendant la coupe. Avec l'oxycoupage, la chaleur et le temps nécessaire pour percer le matériau, ainsi que pour effectuer la coupe, sont supérieurs à ceux requis pour le découpage plasma. La chaleur plus importante ralentit le refroidissement, réduisant ainsi le risque de fragilisation de la zone affectée par la chaleur.

## **Australie/Nouvelle-Zélande**

AS 4100-1998 (R2016), utilise des catégories de détail de fatigue similaires à celles de EN 1993-1-9. Le terme « découpage thermique » est utilisé dans l'article 14.3.3. Pour les ponts autoroutiers et ferroviaires, la norme applicable est la AS 5100.6:2016 sur la conception des ponts, partie 6 : Construction en acier et composite.

### **Bords découpés thermiquement**

Dans AS 4100-1998 (R016), il existe deux catégories de FAT pour les bords découpés thermiquement fournies dans le Tableau 11.5.1(1) Classification de la catégorie de détail - Groupe 1 Détails non soudés, comme indiqué ci-dessous. Le terme utilisé est « coupé au gaz », bien que le paragraphe 14.3.3 sur la coupe stipule que « La découpe peut être effectuée par sciage, cisaillement, taillage, usinage, découpage thermique (y compris la découpe au laser et au plasma) ou la découpe à l'eau, selon le cas ».

FAT140     Matériau avec des bords coupés au gaz ou cisailés sans stries de coupe. Tous les matériaux durcis et les signes visibles de discontinuité de bord doivent être éliminés par usinage ou meulage dans le sens de la contrainte appliquée.

FAT125     Matériau avec des bords coupés au gaz avec des stries de coupe ou un matériau coupé manuellement. Les coins et les signes visibles de discontinuité de bord doivent être éliminés par meulage dans le sens de la contrainte appliquée.

Aucune réduction n'est considérée pour l'acier patinable, comme cela est fait dans d'autres normes, car le paragraphe 11.1.1 stipule que « la réduction de la durée de vie antifatigue due à la corrosion ou à l'immersion » n'est pas traitée.

Dans la norme AS 5100.6:2016, il existe deux catégories FAT pour les bords coupés thermiquement, similaires à EN 1993-1-9 :

FAT140     Coupés au gaz à la machine ou cisailés avec pansement ultérieur. Tous les signes visibles de discontinuité des bords doivent être éliminés. Les zones de découpe doivent être usinées ou meulées et toutes les bavures doivent être éliminées. Toute rayure résultant de la machine, par exemple lors d'opérations de meulage, ne peut être que parallèle aux contraintes. Les coins rentrants doivent être améliorés par meulage (pente  $\leq 1/4$ ) ou évalués à l'aide du facteur de concentration de contrainte approprié. Aucune réparation par remplissage de soudure. Si acier patinable, rétrogradez à FAT125.

FAT125 Matériau avec des bords coupés au gaz à la machine ayant des stries de coupe peu profondes et régulières ou un matériau coupé au gaz à la main, pansé ensuite pour éliminer toutes les discontinuités des bords. Les coupes au gaz avec une qualité de coupe conforme à l'Annexe F. Les coins rentrants doivent être améliorés par meulage (pente  $\leq 1/4$ ) ou évalués à l'aide du facteur de concentration de contrainte approprié. Aucune réparation par remplissage de soudure. Si acier patinable, rétrogradez à FAT112.

Dans la norme AS 5100.6:2016, le paragraphe F3.3 sur la coupe permet de couper « par sciage, cisaillement, taillage, usinage ou thermiquement, selon le cas ». Le Tableau F3.3 sur la rugosité maximale de la surface de coupe fournit deux critères pour la rugosité maximale de la surface dans les applications de fatigue : pour les catégories de détails  $\geq 80$  MPa, 12  $\mu\text{m}$  de CLA ; et pour les catégories de détails  $< 80$  MPa, 25  $\mu\text{m}$  CLA. Pour les applications normales, c'est-à-dire où la face et les bords restent tels qu'ils ont été coupés ou avec un pansement mineur, la rugosité maximale de la surface est de 25  $\mu\text{m}$  de CLA. Les rugosités de la surface de coupe supérieures aux valeurs données dans le Tableau F3.3 doivent être améliorées par meulage, les marques de meulage étant parallèles au sens de la coupe.

### **Trous de boulons**

Dans la norme AS 4100-1998 (R2016) Tableau 11.5.1(1) sur la classification de la catégorie des détails - le groupe 1 sur les détails non soudés concerne les assemblages boulonnés avec la catégorie de boulonnage 8.8/TF (boulons à précontrainte à haute résistance dans le type de joints à friction avec résistance au glissement désignée) en tant que FAT140, vérifiée sur la section brute. Si la résistance n'est pas désignée 8.8/TF, elle reste dans la catégorie de détail 140, mais est vérifiée sur la section nette. Un avertissement est ajouté : « les assemblages de plaque de recouvrement simple sans support doivent être évités ou l'effet de l'excentricité doit être pris en compte dans le calcul des contraintes. » Aucune catégorie de détail spécifique n'est fournie pour les trous ouverts. Le paragraphe 14.3.5.1 sur la perforation permet aux trous ronds pour un boulon d'être « découpés à la flamme, ou percés à la taille réelle, ou sous-poinçonnés et alésés à une taille inférieure de 3 mm [1/8 po], ou poinçonnés à la taille réelle ».

Le paragraphe F3.5.1 Général, de l'article F 3.5 sur la perforation de la norme AS 5100.6:2016 stipule : « Un trou rond pour un boulon doit être soit coupé à la machine, soit percé à la taille réelle, soit sous poinçonné et alésé à une taille inférieure de 3 mm [1/8 po], soit poinçonné à la taille réelle. Pour les ponts de chemin de fer, les trous découpés à la flamme à la taille réelle ou poinçonnés à la taille réelle ne sont pas autorisés. »

Le Tableau 13.10.1(B) des éléments simples et assemblages fixés mécaniquement de la norme AS 5100.6:2016 a adopté les exigences du Tableau 8.1 de la norme EN 1993-1-9 telles que décrites précédemment pour l'Europe, pour les catégories de détail pour les assemblages vissés.

## Marquage plasma

Les équipements de découpage plasma peuvent également être utilisés pour effectuer des fonctions de marquage en utilisant la même tête de découpe, mais avec une puissance réduite (densité de courant). Cela peut comprendre non seulement les marques de pièce et l'étiquetage, mais également les positions précises sur l'élément en acier sur lequel les pièces doivent être fixées, en identifiant les pièces à fixer à cet emplacement, en fournissant le symbole de soudure, les emplacements de marquage des fixations de goudrons soudés, les emplacements à « poinçonner » qui peuvent être réalisés à l'aide d'autres méthodes de perforation et autres indications de travaux spéciaux à effectuer.

Ces marquages doivent être réalisés avec une puissance suffisante pour offrir une visibilité lors de la fabrication et pour permettre une visibilité permanente des marques de pièce et autres indicateurs d'assemblage, le cas échéant, après la préparation de la surface et l'application des revêtements. Dans le cas d'acier de construction exposé architecturalement, il peut être souhaitable de minimiser la visibilité de près des marques permanentes exposées.

Les normes actuelles n'autorisent ni n'interdisent explicitement l'utilisation du marquage au plasma sur l'acier de construction. Des recherches récentes ont fourni des informations sur les effets du marquage au plasma sur les performances des aciers de construction dans les applications statiques et cycliques.

REMARQUE : Les problèmes qui ne sont pas couverts par un code de construction ou une spécification particulière devraient être réglés par l'ingénieur officiel ou une autre autorité technique.

Wagner et al. (Wagner, 2010) ont testé 345 aciers de structure marqués au plasma MPa [50 ksi] utilisant du gaz de protection d'argon à des courants de 6, 10 et 14 ampères. Les profondeurs de coupe des lignes étaient respectivement de 9, 130 et 240  $\mu\text{m}$  [0,00035, 0,005 et 0,0094 po], pour des emplacements autres que les points d'initiation, et des profondeurs de coupe de 130, 310 et 870  $\mu\text{m}$  [0,005, 0,012 et 0,034 po], respectivement, aux points d'initiation et aux emplacements où la coupe est passée sur un emplacement précédemment indiqué (Figure 17).

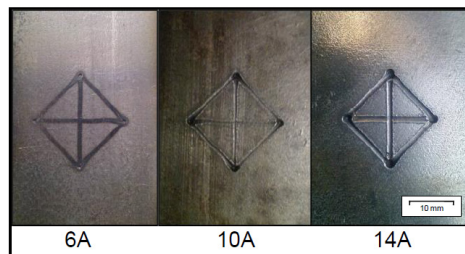


Figure 3. Marquage au plasma utilisant le plasma d'argon à une intensité du courant de marquage de 6 A, 10 A, 14 A

Figure 17. Marquage au plasma à 6 A, 10 A et 14 A

Sous une charge principalement statique, aucune réduction de la résistance à la traction n'a été constatée du fait du marquage au plasma.

Les tests de fatigue ont été réalisés sur des spécimens tubulaires relativement minces d'une épaisseur de 3, 5 et 10 mm [1/8, 3/16, et 3/8 po]. La durée de vie en fatigue en cycle élevé n'était pas influencée de manière significative par l'épaisseur du matériau, mais par la profondeur de la marque au plasma. Les tests ont montré une pente assez plate par rapport à la courbe S-N, avec peu de différence entre les coupures de 6 et 10 ampères et une diminution notable avec une coupe de 14 ampères. Les tests utilisant un poinçon de marquage mécanique ont montré des performances similaires à celles de la coupe de 14 ampères, mais avec une pente légèrement plus raide par rapport à la courbe S-N.

En utilisant les courbes SN des Recommandations de fatigue IIW, une coupe de 6 ou 10 ampères serait classée en tant que 144 N/mm<sup>2</sup> et la coupe de 14 A à 128 N/mm<sup>2</sup>. La recherche a suggéré d'utiliser une classe de FAT de 125, qui est la même classe de FAT que pour les bords coupés thermiquement (Figure 18).

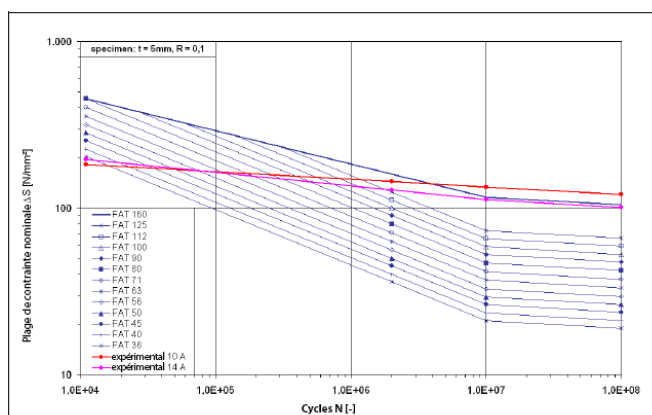


Figure 12. Résultats dans le réseau IIW des courbes S-N

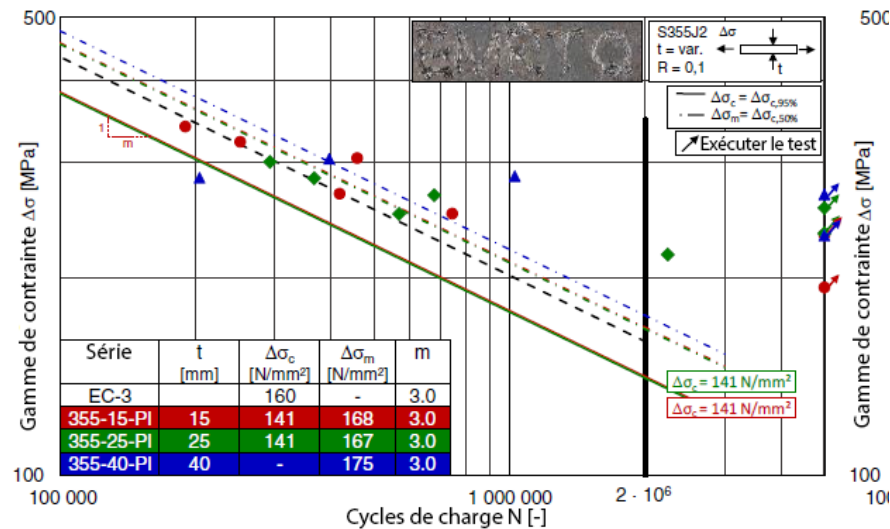
Figure 18. Résultats expérimentaux de la durée de vie antifatigue avec marquage au plasma (Wagner, 2010)

Stranghöner et Jungbluth (Stranghöner et Jungbluth, 2015) ont effectué des essais de fatigue sur des plaques en acier de construction de 345 MPa [50 ksi] et 460 MPa [65 ksi] d'épaisseurs de 15 mm, 25 mm et 40 mm [0,59, 1 et 1,57 po]. Les marques étaient des lettres et des chiffres conventionnels, plutôt que le motif en losange utilisé par Wagner.

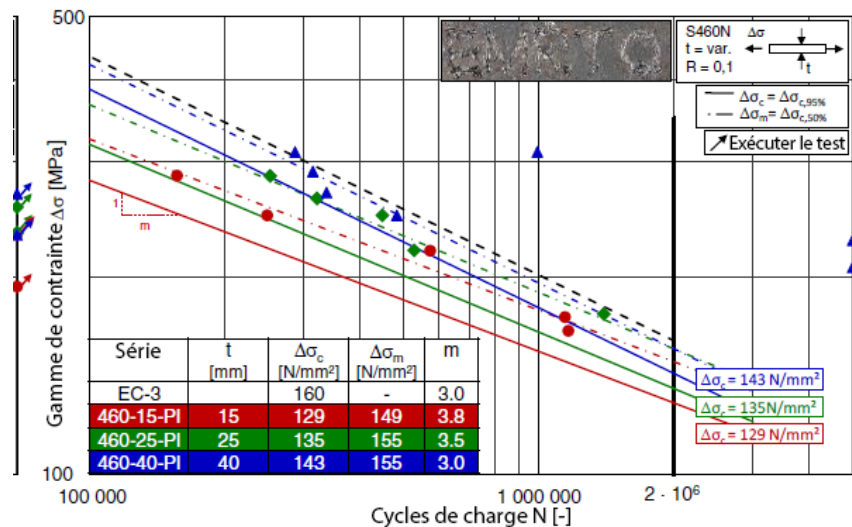
Lorsque les marques étaient faites avec un courant de 6 ampères, il n'y avait aucune influence sur la résistance à la fatigue par rapport à celle du métal de base. À un courant de 10 ampères, les marques de plasma étaient pareillement de forme arrondie, avec une profondeur de marquage maximale aux points d'initiation ou de croisement comprise entre 400 µm et 500 µm [0,016 à 0,020 po], ce qui est légèrement supérieur à ce qui avait été rapporté par Wagner. Les courbes S-N, comparées



aux courbes des Recommandations de fatigue IIW (similaires à EN 1993-1-9), sont représentées à la Figure 19. Les résultats obtenus pour les plaques de 15 mm et 25 mm (0,59 et 1 po) étaient similaires à ceux de Wagner qui utilisait le motif en losange et montraient une meilleure résistance à la fatigue que ceux des spécimens utilisant le marquage à froid. Aucune influence de la résistance de l'acier sur les performances antifatigues n'a été constatée. Les essais de fatigue sur des plaques de 40 mm (1,57 po) étaient irréguliers pour les deux qualités d'acier, d'autres essais ont donc été prévus.



(a)



(b)

Figure 12 Courbes S-N de spécimens marqués au plasma de (a) S355J2 et (b) S460N

Figure 19. Courbes S-N de spécimens marqués au plasma

Manuel et coll. (Manuel, 2014) ont testé une plaque d'acier patinable à 50 ksi [345 MPa], ASTM A709, classe 50 W, de 1/4 po [6 mm] d'épaisseur. Des marquages plasma d'une profondeur d'environ 6  $\mu$ po [150  $\mu$ m] ont été réalisés. Une zone affectée par la chaleur (ZAT) d'environ 200  $\mu$ m (8  $\mu$ po) se trouvait sous la surface de la marque. Les tests de dureté et le facteur de concentration de contrainte résultant ont été pris en compte. Quatorze spécimens ont été testés. Les résultats présentés ont été tracés à l'aide des courbes S-N standard AISC/AWS/AASHTO (voir Figure 20). La durée de vie antifatigue des échantillons portant des marques de plasma ne différait pas de manière mesurable de la durée de vie antifatigue d'un matériau ordinaire. Les auteurs ont toutefois déclaré que davantage d'échantillons devaient être testés avant de pouvoir tirer des conclusions définitives.

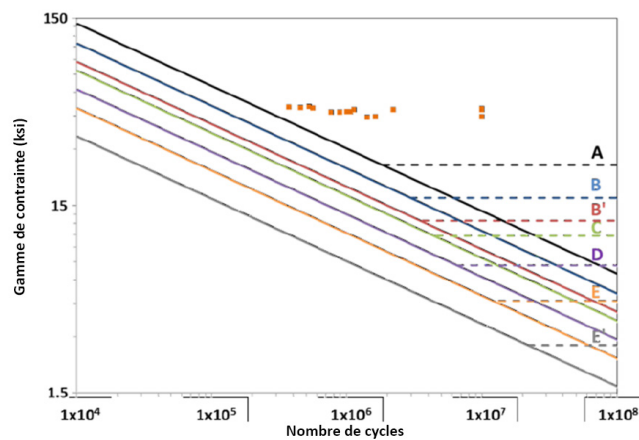


Figure 5-9. Courbe S-N pour l'acier 50W gravé au plasma.

**Figure 20. Courbe S-N pour acier 50 W marqué au plasma**

Sur la base des études ci-dessus, les marques faites avec un maximum de 10 ampères et peut-être jusqu'à 15 ampères devraient être considérées comme acceptables pour les applications à chargement statique. Pour les applications de conception antifatigue, les marques faites avec une intensité maximale de 10 ampères doivent être considérées comme acceptables lorsque la conception utilisant des valeurs de fatigue pour les bords de coupe thermique est utilisée. Les marques faites avec une plage allant de 5 à 6 ampères peuvent être considérées comme acceptables avec des valeurs de conception similaires à celles du métal de base. Toutefois, ces conditions n'ont pas encore été codifiées et les recherches se poursuivent. Notez que les emplacements considérés comme critiques pour les ruptures dans les applications de pont peuvent justifier des limitations supplémentaires, et que les marques ne doivent pas être placées aux emplacements du membre considéré comme critique pour les ruptures.

Au moment de la présente publication, aucun essai connu n'avait été effectué sur des aciers soumis à des applications de fatigue à faible contrainte et à faible cycle de fatigue, comme dans les zones protégées de structures antisismiques. Tant que ces tests ne sont pas effectués, les marquages ne doivent pas être placés à l'intérieur de la région soumise à des contraintes plastiques.

## Critères de qualité pour les surfaces découpées au plasma

La qualité d'une surface coupée thermiquement dépend de nombreuses variables, notamment :

- (1) Épaisseur du matériau
- (2) État de la surface du matériau
- (3) Procédure de coupe, y compris la sélection du gaz
- (4) État et conception de la machine de découpe, y compris les têtes de découpe
- (5) Les vibrations des équipements à proximité, et
- (6) Le mouvement de la pièce dû à la dilatation et à la contraction thermiques

Il existe plusieurs critères de qualité applicables aux exigences de qualité pour un bord coupé thermiquement. Ceux-ci incluent la rugosité de la surface (critère de qualité le plus courant), mais des critères plus spécifiques tels que la perpendicularité et la dureté de la surface de la zone affectée par la chaleur peuvent être requis pour certaines applications et certaines normes.

### Rugosité de surface

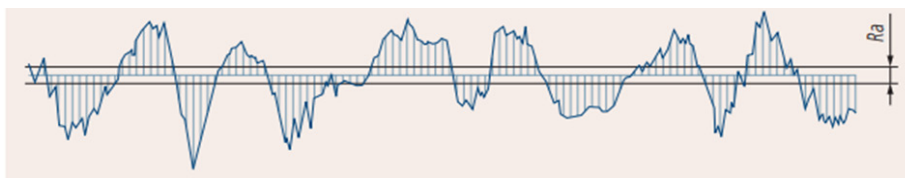
La mesure de la rugosité de surface, y compris la terminologie générale, les définitions de la plupart des paramètres de mesure, les procédures de mesure, le filtrage des données et les informations connexes, est traitée dans trois normes principales :

- ▶ ISO 4287:1997 *Spécification géométrique des produits (GPS) - État de surface : Méthode du profil - Termes, définitions et paramètres de texture de surface*
- ▶ ISO 4288:1996 *Spécification géométrique des produits (GPS) - État de surface : Méthode du profil - Règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface*
- ▶ ASME B46.1:2009 *Texture de surface (rugosité, ondulation et dépôt de la surface)*

Deux critères, Ra et Rz, sont les critères les plus couramment utilisés pour la rugosité de surface. Les deux critères ne sont pas directement liés et ne peuvent pas être convertis mathématiquement d'un critère à l'autre. Les mesures Ra et Rz sont exprimées en termes de  $\mu\text{po}$  en unités usuelles, et de  $\mu\text{m}$  en unités SI.

$\mu\text{po}$  - micropouce, un millionième de pouce (0,000001 po), 1  $\mu\text{po}$  est égal à 0,0254  $\mu\text{m}$

$\mu\text{m}$  - micromètre, un millionième de mètre (0,000001 m), 1  $\mu\text{m}$  est égal à 39,37  $\mu\text{po}$



> **Figure 6** : Valeur de rugosité moyenne arithmétique  $R_a$

Source : Guide rapide de Mitutoyo pour la mesure de la rugosité de surface

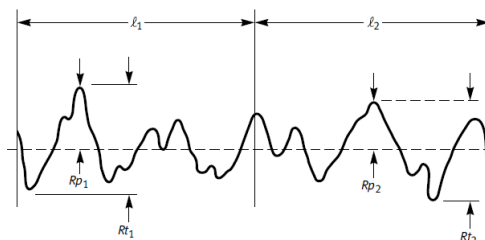
**Figure 21. Valeur de rugosité moyenne arithmétique  $R_a$**

$R_a$  (moyenne de rugosité) est définie comme une « moyenne arithmétique des valeurs absolues des hauteurs du profil sur la longueur d'évaluation » et est égale à la somme des zones ombrées du profil divisées par la longueur d'évaluation  $L$ , qui comprend généralement plusieurs longueurs d'échantillonnage ou valeurs seuil. Pour les déterminations graphiques de la rugosité, les écarts de hauteur sont mesurés perpendiculairement à l'axe du graphique.

$R_a$  est également connue sous le nom de moyenne arithmétique de la ligne centrale (AA) et moyenne de la ligne centrale (CLA).

L'autre paramètre commun, la hauteur maximale moyenne du profil  $R_z$ , est défini dans la norme ASME B46.1 comme étant « la moyenne des valeurs successives de  $R_{t_i}$  calculée sur la longueur d'évaluation » et est illustrée à la Figure 22. Le profil de surface contenant deux longueurs d'échantillonnage,  $l_1$  et  $l_2$ , affichant également les paramètres  $R_{p_i}$  et  $R_{t_i}$ .  $R_{t_i}$  est « la distance verticale entre les points le plus haut et le plus bas du profil dans un segment de longueur d'échantillonnage nommé  $l$ . »  $R_{z5}$  indique que cinq longueurs d'échantillonnage, ou valeurs seuil, sont utilisées (voir la Figure 23).

Fig. 1-10 Profil de surface contenant deux longueurs d'échantillonnage,  $l_1$  et  $l_2$ , affichant également les paramètres  $R_{p_i}$  et  $R_{t_i}$



**Figure 22. ASME B46.1 Figure 1-10 - Mesure du profil de surface**

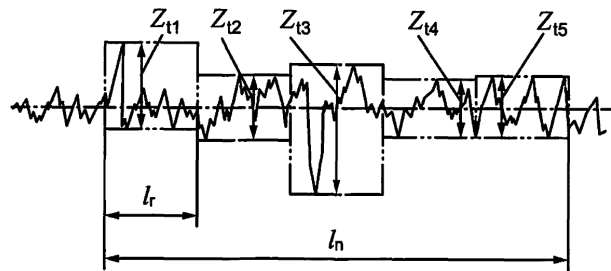


Figure 23. ISO 9013:2017, Figure 7 - Hauteur moyenne du profil Rz5

## Outils de mesure de la rugosité de surface

La norme AWS C4.1-77 (R2010) *Criteria for Describing Oxygen-Cut Surfaces and Oxygen Cutting Surface Roughness Gauge* (Critères de description des surfaces oxycoupées et jauge de rugosité de surface oxycoupées) a été publiée en 1977 et a été réaffirmée en 2010. Cette norme utilise du texte et une réplique en plastique distincte du Guide de rugosité de surface pour l'oxycoupage, qui présente quatre échantillons de surfaces oxycoupées avec différents niveaux de qualité. Bien que le titre de la réplique standard et en plastique indique « Oxycoupage », il est également couramment utilisé pour le découpage plasma (voir Figure 24).

L'utilisation de la réplique en plastique doit servir de comparateur visuel, plutôt que de comparateur tactile, en la maintenant tout près des surfaces découpées thermiquement examinées, puis en sélectionnant la valeur de rugosité de surface la plus représentative.

Les répliques standard et en plastique n'indiquent pas la valeur de rugosité de surface spécifique, mais il a été vérifié et il est généralement accepté d'utiliser les échantillons pour les valeurs de rugosité de surface Ra suivantes :

TABLEAU 12. RUGOSITÉ DE SURFACE RA POUR CHAQUE NUMÉRO D'ÉCHANTILLON AWS

| Numéro d'échantillon | Rugosité de surface Ra |               |
|----------------------|------------------------|---------------|
|                      | $\mu\text{m}$          | $\mu\text{m}$ |
| 1                    | 4 000                  | 100           |
| 2                    | 2 000                  | 50            |
| 3                    | 1 000                  | 25            |
| 4                    | 500                    | 12,5          |

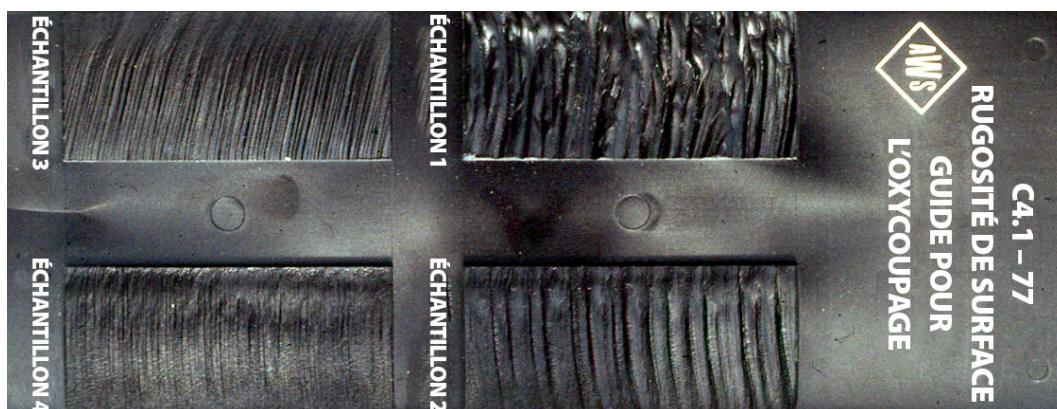


Figure 24. AWS C4.1-77 Guide de rugosité de surface

### Australie/Nouvelle-Zélande Mesure de la rugosité de la surface coupée

La rugosité de surface peut être évaluée par examen visuel assisté par comparaison avec la surface de répliques en résine de polyester. Ces répliques représentent 3 classes de rugosité de surface, telles que décrites dans la Figure 25 de la WTIA Note technique 5 - *Coupe à la flamme de l'acier*, publiée en avril 1975 (WTIA, 1975).

Les surfaces de répliques découpées à la flamme ont été préparées par l'AWRA (Association australienne de recherche sur le soudage, organisation remplacée par le Welding Technology Institute of Australia ou WTIA), désormais appelée Weld Australia (WA). Elles ont été développées en utilisant le découpage à la flamme avec un équipement standard dans un état bien entretenu.

Tableau 11 – des classes de rugosité de surface coupées à la flamme AWRA

| Classe de coupe<br>Remarque 1 | Rugosité (CLA)<br>AS 1100 Partie II – 1974<br>(Microns) Remarques 2, 3, 4, 5                                                                                                                                                                                                 | Rugosité (CLA)<br>AS B131 – 1962<br>(Micro-pouces) Remarques 2, 3, 4, 5 |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1                             | < 6.3                                                                                                                                                                                                                                                                        | < 250                                                                   |
| 2                             | 6.3 – 12.5                                                                                                                                                                                                                                                                   | 250 – 500                                                               |
| 3                             | 12.5 – <25                                                                                                                                                                                                                                                                   | 500 – < 1000                                                            |
| Remarques                     |                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                         |
| 1                             | Les trois classes de découpage au chalumeau sont faciles à obtenir avec un équipement de bonne qualité et des techniques appropriées.                                                                                                                                        |                                                                         |
| 2                             | AS B131-1962 « Méthode de la hauteur moyenne de l'axe des lignes (système M) pour l'évaluation de l'état de surface », et AS 1100, Partie 11-1974 « Indication pratique de dessin de l'état de surface. »                                                                    |                                                                         |
| 3                             | Ces normes définissent la rugosité de surface en fonction de la valeur moyenne de la ligne médiane (CLA). Pour la coupe à la flamme, la distance moyenne en le creux et la hauteur maximale de la surface correspond généralement à 4 fois la hauteur indiquée par la CLA. + |                                                                         |
| 4                             | micron = 0,001 mm ; et 1 micropouce = 0,000001 po<br>0,025 micron (pm)                                                                                                                                                                                                       |                                                                         |
| 5                             | La rugosité réelle des répliques AWRA est respectivement de 3, 6,3 et 19 microns pour les classes 1, 2 et 3.                                                                                                                                                                 |                                                                         |

Figure 25. Réimpression des classes de rugosité de surface coupées à la flamme AWRA



Le Tableau 13 compare la réplique en plastique de la norme AWS C4.1-77 (R2010) *Guide de rugosité de surface pour l'oxycoupage* aux classes WA/WTIA ci-dessus :

| TABLEAU 13. COMPARAISON DE LA RÉPLIQUE WTIA ET DE LA RÉPLIQUE AWS |                                                   |             |                         |                          |                |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|----------------|
| WTIA Rugosité réelle<br>de la réplique<br>$\mu\text{m}$           | Plage de rugosité<br>classe WTIA<br>$\mu\text{m}$ | Classe WTIA | Échantillon<br>AWS C4.1 | Rugosité de réplique AWS |                |
|                                                                   |                                                   |             |                         | $\mu\text{m}$            | $\mu\text{po}$ |
| 3                                                                 | < 6,33                                            | 1           | Aucun                   | —                        | —              |
| 6,3                                                               | 6,3 – 12,5                                        | 2           | 4                       | 12,5                     | 500            |
| 19                                                                | 12,5 ≤ 25                                         | 3           | 3                       | 25                       | 1 000          |
| —                                                                 | —                                                 | Aucun       | 2                       | 50                       | 2 000          |
| —                                                                 | —                                                 | Aucun       | 1                       | 100                      | 4 000          |

La réplique AWS peut être utilisée pour vérifier la conformité à la classe WTIA 2 en utilisant l'échantillon 4 comme rugosité maximale de la surface et la conformité à la classe WTIA 3 en utilisant l'échantillon 3 comme rugosité de surface maximale. Pour vérifier la classe WTIA 1, vous devez utiliser une autre jauge de rugosité de surface, telle que celles utilisées pour l'usinage.

### Instruments de mesure de rugosité de surface/profil de type à contact

Il existe de nombreux fabricants et styles d'instruments de mesure de la rugosité de surface par contact. Ces instruments utilisent une pointe de stylet qui entre directement en contact avec la surface d'un échantillon. La pointe du stylet trace la surface de l'échantillon et détecte électriquement le mouvement vertical du stylet. Les signaux électriques sont traités, y compris le filtrage, et des enregistrements numériques sont générés.

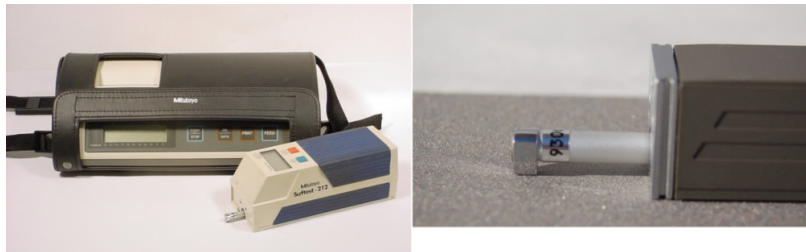


Figure 26. Instrument de rugosité de surface de type à contact

### **Dureté de surface**

EN 1090-2:2018 contient des critères d'acceptation pour la dureté maximale d'un bord coupé thermiquement, énoncés dans 6.4.4 Dureté des surfaces des bords libres.

Les bords coupés thermiquement en acier au carbone d'une limite d'élasticité de 460 MPa [65 ksi] ne peuvent pas dépasser une dureté maximale de 450 mesurée sur l'échelle HV10. En outre, une note indique que des exigences peuvent être nécessaires si le bord libre est soumis à la fatigue ou aux chocs, s'il est sujet à une fragilisation par l'hydrogène ou dans le but de s'assurer qu'il convient à la préparation de la surface avant l'application de peintures et de produits connexes.

De plus, une attention particulière devrait être accordée aux bords libres galvanisés à chaud.

## Normes et bibliographie citées

| American Institute of Steel Construction                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                        | <a href="http://www.aisc.org">www.aisc.org</a>                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| AISC 360-16                                                                                                                                    | Specification for Structural Steel Buildings (Spécifications pour les bâtiments en acier de construction)                                                                                                                              | 2016                                                                                 |
| AISC 341-16                                                                                                                                    | Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (Dispositions sismiques pour les bâtiments en acier de construction)                                                                                                                 | 2016                                                                                 |
| AISC 358-16                                                                                                                                    | Assemblages préqualifiés pour les armatures à moments d'acier spéciaux et intermédiaires pour les applications sismiques                                                                                                               | 2016                                                                                 |
|                                                                                                                                                | Manuel de construction en acier, 15e édition                                                                                                                                                                                           | 2016                                                                                 |
| American Welding Society                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                        | <a href="http://www.aws.org">www.aws.org</a>                                         |
| AWS D1.1/D1.1M:2015                                                                                                                            | Structural Welding Code – Steel (Code de soudage de construction - Acier)                                                                                                                                                              | 2015                                                                                 |
| AWS D1.8/D1.8M:2016                                                                                                                            | Structural Welding Code – Seismic Supplement (Code de soudage de construction - Supplément sismique)                                                                                                                                   | 2016                                                                                 |
| AASHTO/AWS D1.5M/D1.5:2015                                                                                                                     | Bridge Welding Code (Code de soudage des ponts)                                                                                                                                                                                        | 2015                                                                                 |
| AWS C4.1-77                                                                                                                                    | Criteria for Describing Oxygen-Cut Surfaces and Oxygen Cutting Surface Roughness Gauge (Critères de description des surfaces oxycoupées et jauge de rugosité de surface oxycoupées)                                                    | 1977                                                                                 |
| Research Council on Structural Connections (Conseil de recherche sur les assemblages de construction)                                          |                                                                                                                                                                                                                                        | <a href="http://www.boltcouncil.org">www.boltcouncil.org</a>                         |
|                                                                                                                                                | Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts (Spécification pour les joints de charpente utilisant des boulons à haute résistance)                                                                                    | 2014                                                                                 |
| American Association of State Highway and Transportation Officials (Association américaine responsable de l'état des routes et des transports) |                                                                                                                                                                                                                                        | <a href="http://www.aashto.org">www.aashto.org</a>                                   |
|                                                                                                                                                | AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (Spécifications de conception du pont)                                                                                                                                                        |                                                                                      |
| Association canadienne de normalisation                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                        | <a href="https://www.csagroup.org/">https://www.csagroup.org/</a>                    |
| CSA S16-14                                                                                                                                     | Conception des structures en acier                                                                                                                                                                                                     | 2014                                                                                 |
| CSA W59-18                                                                                                                                     | Welded steel construction (Construction en acier soudé)                                                                                                                                                                                | 2018                                                                                 |
| Comité européen de normalisation (CEN)                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                        | <a href="https://shop.bsigroup.com">https://shop.bsigroup.com</a> (British adoption) |
| EN 1090-2:2018                                                                                                                                 | Execution of steel structures and aluminium structures (Exécution des structures en acier et des structures en aluminium) – Partie 2 : Technical requirements for steel structures (Exigences techniques pour les structures en acier) | 2018                                                                                 |
| EN 1993-1-9:2005                                                                                                                               | Eurocode 3, EN 1993, Conception des structures en acier, Partie 1-9 : Fatigue                                                                                                                                                          | 2005                                                                                 |

| Norme d'Australie et de Nouvelle-Zélande |                                                                                                                                                                      | <a href="https://infostore.saiglobal.com">https://infostore.saiglobal.com</a> |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| AS 4100-1998 [R2016]                     | Structures en acier                                                                                                                                                  | 2016                                                                          |
| NZS 3404.1 [2007]                        | Steel Structures Standard [Normes des structures en acier]                                                                                                           | 2007                                                                          |
| AS/NZS 5131:2016                         | Structural Steel Work—Fabrication and Erection [Ouvrages en acier de construction - fabrication et montage]                                                          | 2016                                                                          |
| AS/NZS 1554.1:2014                       | Structural steel welding, [Soudure d'acier de construction] Partie 1 : Welding of Steel Structures, neuvième édition 2014                                            | 2014                                                                          |
| AS/NZS 1554.4:2014                       | Structural steel welding, [Soudure d'acier de construction] Partie 4 : Welding of High Strength Quenched and Tempered Steels, quatrième édition 2014                 | 2014                                                                          |
| AS/NZS 1554.5:2014                       | Structural steel welding, [Soudure d'acier de construction] Partie 5 : Welding of Steel Structures Subject to High Levels of Fatigue Loading, cinquième édition 2014 | 2014                                                                          |

| Architectural Institute of Japan |                                                                                                                                                                    | <a href="https://www.aij.or.jp/eng/publish/index.htm">https://www.aij.or.jp/eng/publish/index.htm</a> |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| JASS 6 [2007]                    | Structural Steelwork Specification for Building Construction [en anglais] [spécifications de la construction métallique pour le bâtiment]                          | 2007                                                                                                  |
| JASS 6 [2018]                    | Structural Steelwork Specification for Building Construction [11 <sup>e</sup> édition en japonais] [spécifications de la construction métallique pour le bâtiment] | 2018                                                                                                  |

| Organisation internationale de normalisation |                                                                                                                                                                                                                                          | <a href="http://www.iso.org">www.iso.org</a> |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| ISO 9013:2017                                | Thermal cutting — Classification of thermal cuts — Geometrical product specification and quality tolerances [Découpe thermique - Classification des coupes thermiques - Spécification géométrique des produits et tolérances de qualité] | 2017                                         |

| British Standards Institution |                                                                                                                                 | <a href="http://www.bsigroup.com">www.bsigroup.com</a> |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| BS 7608:2014 + A1:2015        | Guide to Fatigue Design and Assessment of Steel Products [Guide de conception en fatigue et d'évaluation des produits en acier] | 2015                                                   |

1. Bannister et al, 2016; High performance cut edges in structural steel plates for demanding applications (HIPERCUT), EUR 28092EN, Directorate-General for Research and Innovation, 2016, <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a0290b88-9ac8-11e6-868c-01aa75ed71a1/language-en> ISSN 1831-9424 ; ISBN 978-92-79-61683-9 ; DOI 10.2777/525963
2. Hobbacher, 2016; Recommendations for fatigue design of welded joints and components, 2<sup>nd</sup> Edition, International Institute of Welding, IIW-2259-15, <https://www.springer.com/us/book/9783319237565>, ISBN 978-3-319-23756-5, DOI 10.1007/978-3-319-23757-2
3. Garcia and Cicero, 2016; Proposal of AASHTO Fatigue Detail Categories for Structural Steels Containing Thermally Cut Edges and Cut Holes, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 28(12), 2016, [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001643](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001643) DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001643
4. Wagner et al, 2010; Influence of plasma marking on static and fatigue strength of construction steels, 63rd Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding, AWST-10/36,
5. Stranghöner and Jungbluth, 2015; Fatigue strength of marked steel components, 6th Fatigue Design conference, Fatigue Design 2015, Procedia Engineering 133 ( 2015 ) 282 – 293, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
6. Manuel, 2014; Experimental Investigation of the Effect of Surface Markings on the Mechanical Integrity of Weathering Bridge Steels (Étude expérimentale de l'effet des marques de surface sur l'intégrité mécanique des aciers de ponts patinable) : Final Report, FDOT Contract Number: BDV31-977-02, 2014, [http://www.fdot.gov/research/Completed\\_Proj/Summary\\_SMO/FDOT-BDV31-977-02-rpt.pdf](http://www.fdot.gov/research/Completed_Proj/Summary_SMO/FDOT-BDV31-977-02-rpt.pdf)

## Résumé et avertissement

Le découpage et le marquage au plasma constituent un processus efficace et largement utilisé. Souvent, les dispositions des codes ou des normes ne sont pas comprises et le découpage et le marquage au plasma sont inutilement limités pour une application. Ce document visait à examiner et à faire la lumière sur les dispositions du code applicables qui traitent du découpage plasma dans le secteur de la construction.

**No 1**

**SYSTÈME DE FABRICATION ROBOTIQUE DE STRUCTURES DANS LE MONDE**



**PLUS DE 360 SYSTÈMES PYTHONX EN FONCTIONNEMENT**



Entrer en contact avec PythonX :



**Siège de PythonX :**

Burlington Automation

63 Innovation Drive

Hamilton, ON

Canada L9H 7L8

Sans frais : 1-833-PYTHONX

Tél. : +1 905 689-7771

Télécopie : +1 905 689-7773

info@pythonx.com

**[www.PythonX.com](http://www.PythonX.com)**

**The Lincoln Electric Company**

22801 Saint Claire Avenue

Cleveland, OH 44117-1199 É.-U.

CA30-012119BC1-00

© 2019 Lincoln Global, Inc. Tous droits réservés.