Document de support à la présentation :

Conception des charpentes d’aluminium

Module 8 – Assemblages soudés

Contenu développé par :

**Ahmed Rahem, ing., Ph. D.**

Professeur au Département des sciences appliquées de l’UQAC

Table des matières

[Note 5](#_Toc127372018)

[A- Généralités sur le soudage 6](#_Toc127372019)

[Diapositive 5 et 6: 6](#_Toc127372020)

[B- Comparaisons des propriétés des séries d’aluminium 9](#_Toc127372021)

[Diapositive 9 : 9](#_Toc127372022)

[Diapositive 11 : 9](#_Toc127372023)

[Diapositive 13 : 10](#_Toc127372024)

[Diapositive 14 : 11](#_Toc127372025)

[Diapositive 15 : 12](#_Toc127372026)

[Diapositive 16 et 17 : 12](#_Toc127372027)

[Diapositive 18 : 13](#_Toc127372028)

[Diapositive 19 : 13](#_Toc127372029)

[Diapositive 21 : 13](#_Toc127372030)

[Diapositive 23 : 14](#_Toc127372031)

[Diapositive 25 : 15](#_Toc127372032)

[Diapositive 26 : 15](#_Toc127372033)

[Diapositive 28 : 16](#_Toc127372034)

[C- Conception des assemblages soudés 18](#_Toc127372035)

[Diapositive 32 : 18](#_Toc127372036)

[Diapositive 33 : 20](#_Toc127372037)

[Diapositive 35 : 21](#_Toc127372038)

[Diapositive 36 : 22](#_Toc127372039)

[Diapositive 37 : 22](#_Toc127372040)

[Diapositive 38 : 23](#_Toc127372041)

[Diapositive 40 : 24](#_Toc127372042)

[Diapositive 41 : 24](#_Toc127372043)

[Diapositive 43 : 25](#_Toc127372044)

[Diapositive 45 : 25](#_Toc127372045)

[Diapositive 46 : 26](#_Toc127372046)

[Diapositive 47 : 26](#_Toc127372047)

[Diapositive 48 : 26](#_Toc127372048)

[Diapositive 50 : 26](#_Toc127372049)

[Diapositive 51 : 27](#_Toc127372050)

[Diapositive 52 : 28](#_Toc127372051)

[D- Procédés de soudage à l’arc 29](#_Toc127372052)

[Diapositive 55 : 29](#_Toc127372053)

[Diapositive 57 : 30](#_Toc127372054)

[Diapositive 58 : 32](#_Toc127372055)

[Diapositive 60 : 32](#_Toc127372056)

[Diapositive 62 : 33](#_Toc127372057)

[E- Autres procédés de soudage 35](#_Toc127372058)

[Diapositive 65 : 35](#_Toc127372059)

[Diapositive 67 et 68 : 35](#_Toc127372060)

[Diapositive 69 : 36](#_Toc127372061)

[Diapositive 70 : 37](#_Toc127372062)

[Diapositive 71 : 37](#_Toc127372063)

[Diapositive 73 : 38](#_Toc127372064)

[Diapositive 74 : 39](#_Toc127372065)

[Diapositive 76 : 40](#_Toc127372066)

[Diapositive 79 : 40](#_Toc127372067)

[Diapositive 81 : 41](#_Toc127372068)

[Diapositive 83 : 42](#_Toc127372069)

[Diapositive 85 : 43](#_Toc127372070)

[Diapositive 87 : 44](#_Toc127372071)

[Diapositive 89 : 45](#_Toc127372072)

[F- Résistance des soudures à rainure 47](#_Toc127372073)

[Diapositive 93 : 47](#_Toc127372074)

[Diapositive 95 : 48](#_Toc127372075)

[Diapositive 97 : 48](#_Toc127372076)

[G- Résistance des soudures à bords tombés 50](#_Toc127372077)

[Diapositive 100 : 50](#_Toc127372078)

[Diapositive 102 : 50](#_Toc127372079)

[H- Assemblages concentriques avec soudure d’angle 52](#_Toc127372080)

[Diapositive 105 : 52](#_Toc127372081)

[Diapositive 106 : 52](#_Toc127372082)

[Diapositive 107 : 53](#_Toc127372083)

[Diapositive 108 : 54](#_Toc127372084)

[Diapositive 109 : 54](#_Toc127372085)

[Diapositive 110 : 55](#_Toc127372086)

[Diapositive 111 : 55](#_Toc127372087)

[I- Assemblages soudés excentriques en torsion 57](#_Toc127372088)

[Diapositive 114 : 57](#_Toc127372089)

[J- Assemblages soudés excentriques en flexion 59](#_Toc127372090)

[K- Assemblages pour le transfert d’un effort tranchant 60](#_Toc127372091)

[Diapositive 135 : 60](#_Toc127372092)

[L- Exemples pratiques 61](#_Toc127372093)

# Note

Avec la permission de monsieur Denis Beaulieu, une certaine partie du matériel est reproduite des manuels *Calcul des charpentes d’aluminium* et *Les caractéristiques de l’aluminium structural*. Bien que l'utilisation du matériel ait été autorisée, monsieur Beaulieu n'est pas responsable de la manière dont les données sont présentées, ni de toute représentation ou interprétation.

# Généralités sur le soudage

## Diapositive 5 et 6:

Le soudage est un procédé au cours duquel on réalise l’union de deux pièces par fusion et solidification de leurs parties en contact, avec ou sans métal d’apport. Les soudures dites structurales, qui font l’objet de chapitre, sont celles dont la fonction est de transférer des efforts d’une pièce à l’autre. Pour l’exécution de ces soudures, il y a généralement apport de métal, produit par la fusion d’une électrode ou d’un fil de soudage.

Dans la fabrication de charpentes d’aluminium, on utilise également la soudure à des fins non structurales. Par exemple, pour fixer provisoirement ensemble les pièces à assembler avant de réaliser l’assemblage final (soudage par point) ou pour assurer l’étanchéité de deux pièces en contact, c’est-à-dire empêcher l’infiltration d’eau ou d’autres matières corrosives sur la surface de contact des deux pièces (soudure d’étanchéité).

Pour réaliser un joint soudé de bonne qualité, l’exécution de la soudure est plus importante qu’un calcul précis de la soudure.

**8.1 Généralités sur le soudage**

**8.1.1 Résistance des pièces et des assemblages soudés**

Ce chapitre sur le calcul des assemblages soudés est le complément du chapitre précédent qui porte sur le calcul des assemblages mécaniques. Il convient, à cet effet, de prendre connaissance du contenu de la sous-section 7.1.1[[1]](#footnote-1). On regroupe sous les appellations assemblages mécaniques et assemblages soudés la presque totalité des assemblages utilisés dans les charpentes et les structures en aluminium.

Si les assemblages mécaniques paraissent complexes à réaliser, il faut dès à présent préciser que les assemblages soudés le sont davantage. Pour souder des métaux comme l’aluminium ou l’acier, il faut des soudeurs qualifiés qui travaillent en équipe avec des ingénieurs spécialistes en soudage, et une équipe spécialisée dans le soudage de l’acier ne possède pas, a priori, les compétences nécessaires pour souder l’aluminium.

Bien que l’ingénieur concepteur ne s’approprie généralement pas l’entière responsabilité de la réalisation des assemblages soudés, il doit, par contre, savoir les calculer et en connaître les principales particularités. C’est le but visé par le présent chapitre.

Le soudage et ses effets sur la résistance des pièces ont été abordés dans les chapitres précédents, en particulier les chapitres II, IV et V. La lecture des passages de ces chapitres qui traitent du soudage facilitera la compréhension des concepts présentés dans le présent chapitre.

L’influence du soudage a été étudiée de façon assez détaillée dans la section 2.6. On a vu que la résistance des alliages non traitables thermiquement (séries 1000, 3000 et 5000), après soudage, est considérée comme la résistance dans l’état recuit (état O; figure 2.25[[2]](#footnote-2)) et que la résistance des alliages traités thermiquement (séries 2000, 6000 et 7000) est réduite à une valeur intermédiaire entre celle du métal de base traité thermiquement et celle du même métal à l’état recuit. Leurs propriétés, après soudage, s’approchent des propriétés à l’état T4 (mise en solution et trempe), selon la figure 2.27[[3]](#footnote-3). En général, les alliages traités thermiquement sont beaucoup plus affectés par le soudage que les alliages non traitables thermiquement (figure 2.14). Des moyens pour limiter la réduction des propriétés mécaniques des alliages sont présentés à la sous-section 2.6.4.

Plusieurs des propriétés physiques figurant au tableau 2.6[[4]](#footnote-4) ont des incidences très marquées sur le soudage de l’aluminium, comme on l’a vu dans les chapitres précédents et comme on le verra également plus loin. Les valeurs de résistance mécanique réduites par le soudage sont présentées dans les tableaux 2.8[[5]](#footnote-5) et 2.9[[6]](#footnote-6) pour les alliages couramment utilisés en construction.

Quelques aspects importants de la soudabilité des alliages d’aluminium ont été étudiés à la section 2.13. La lecture de cette section permet de mieux comprendre les subtilités du soudage de l’aluminium et d’éviter de commettre des erreurs qui pourraient engendrer des problèmes de fatigue, par exemple. On y trouve aussi suffisamment d’information pour procéder à un choix judicieux du métal d’apport pour relier des pièces en alliages d’aluminium (sous-section 2.13.8).

Le problème des soudures transversales et longitudinales est décrit à la sous-section 4.4.4, en ce qui a trait au calcul des épaisseurs et des aires de section effectives à considérer pour l’analyse et le dimensionnement des pièces. La résistance en traction des pièces soudées est traitée à la section 4.5, la résistance en compression à la sous-section 5.6.1, la résistance en flexion à la sous-section 6.2.3 et la résistance en cisaillement à la sous-section 6.4.3. Enfin, l’influence des contraintes résiduelles induites par le soudage sur la résistance des pièces comprimées est étudiée à la sous-section 5.4.5.

On complétera l’étude de l’influence du soudage sur les charpentes d’aluminium en examinant de près le comportement des assemblages soudés eux-mêmes dans les paragraphes qui suivent.

**O** : *Recuit*. S’applique aux alliages de corroyage qui sont recuits pour obtenir l’état le plus doux et aux alliages de fonderie pour améliorer leur ductilité et leur stabilité dimensionnelle. Le O peut être suivi d’un chiffre autre que zéro, qui indique un produit ayant des caractéristiques particulières. Le recuit consiste à réchauffer à nouveau le métal et à le laisser refroidir lentement.

# Comparaisons des propriétés des séries d’aluminium

## Diapositive 9 :

**7.6 comparaison des propriétés des séries d’aluminium**

Les différentes séries d’alliages de corroyage peuvent être classées en deux catégories, comme nous l’avons déjà vu : les alliages non traitables thermiquement (séries 1000, 3000 et 5000) et les alliages traitables thermiquement (séries 2000, 4000, 6000 et 7000). La série 4000, qui **n’est pas utilisée structuralement**, fait quelque peu exception, tel que déjà mentionné aux sous-sections 6.2[[7]](#footnote-7) et 6.3[[8]](#footnote-8).

La figure 14 (voir acétate) donne une idée des niveaux relatifs de résistance mécanique qu’il est possible d’obtenir, selon les méthodes utilisées pour augmenter la résistance des alliages d’aluminium. L’aluminium pur à l’état recuit (1100-O) est comparé à un alliage Al-Mn recuit de la série 3000, à un alliage (Al-Mg) à l’état écroui Dur de la série 5000 (non traitable thermiquement), ainsi qu’à un alliage traité thermiquement à l’état T6 (mis en solution et vieilli artificiellement) de la série 2000. La figure indique, qu’en général, les alliages traités thermiquement offrent une meilleure résistance que les alliages non traitables thermiquement et que ces derniers sont à leur tour plus résistants que les alliages qui n’ont subi aucun traitement thermique ou travail mécanique. Le soudage, comme on le verra plus loin, viendra changer quelque peu les données.

## Diapositive 11 :

**8.1.2 Normes sur le soudage**

Le soudage est un procédé au cours duquel on réalise l’union de deux pièces par fusion et solidification de leurs parties en contact, avec ou sans métal d’apport. Les soudures dites structurales, qui font l’objet de chapitre, sont celles dont la fonction est de transférer des efforts d’une pièce à l’autre. Pour l’exécution de ces soudures, il y a généralement apport de métal, produit par la fusion d’une électrode ou d’un fil de soudage.

Dans la fabrication de charpentes d’aluminium, on utilise également la soudure à des fins non structurales. Par exemple, pour fixer provisoirement ensemble les pièces à assembler avant de réaliser l’assemblage final (soudage par point) ou pour assurer l’étanchéité de deux pièces en contact, c’est-à-dire empêcher l’infiltration d’eau ou d’autres matières corrosives sur la surface de contact des deux pièces (soudure d’étanchéité).

Pour réaliser un joint soudé de bonne qualité, l’exécution de la soudure est plus importante qu’un calcul précis de la soudure. Par conséquent, l’exécution et l’inspection des soudures ont fait l’objet de normes très élaborées.

Au Canada, le Bureau canadien de soudage, une division de l’Association canadienne de normalisation (ACNOR), est l’organisme chargé de la qualification et de la certification des entreprises qui exécutent des soudures et de celles qui font l’inspection des soudures. La norme W47.2 spécifie les prescriptions minimales auxquelles une entreprise de soudage doit se conformer et qu’elle doit adopter pour obtenir et maintenir sa certification. Les normes W178.1 et AW178.2 permettent d’évaluer les qualifications des entreprises et des inspecteurs qui dispensent des services d’inspection en soudage. La norme W59.2 et son équivalent américain, la norme AWS D1.2, de portée générale, concernent davantage les concepteurs et visent tous les types de constructions soudées en aluminium. La norme S157 complète le tableau en fournissant des règles précises pour le calcul des assemblages soudés.

Les méthodes d’inspection des soudures comprennent des méthodes non destructives, telles que la radiographie, l’ultrasonographie, le contrôle visuel, et des méthodes destructives (essais mécaniques). Une entreprise qui fait l’inspection de soudures peut être certifiée pour une ou plusieurs méthodes d’inspection et pour une ou plusieurs catégories d’ouvrages (bâtiments, ponts, navires, réservoirs, machinerie, etc.).

## Diapositive 13 :

**8.1.3 Types de joints soudés et types de soudures**

**Le type de soudure utilisé pour assembler deux pièces dépend du type de joint soudé**. Pour les joints bout à bout, on utilise des soudures à **rainure** aussi **appelées soudures bout à bout** (figure 8.1, voir acétates 13 et 14). Pour les joints soudés en T ou en coin, on peut utiliser des soudures à rainure ou des soudures d’angle (figure 8.2, voir acétates 15 et 16). Pour les joints à recouvrement, on peut utiliser des soudures d’angle ou des soudures en bouchons ou en entailles (figure 8.3, voir acétates 17 et 18).

Pour les soudures à rainure (ou soudures sur préparation), la section de la rainure peut prendre diverses formes, selon le type de chanfrein (ou de préparation) utilisé pour les pièces à joindre, tel qu’illustré sur les figures 8.1 et 8.2. Pour ce type de soudure, on distingue les soudures à pénétration complète et les soudures à pénétration partielle.

On utilise des soudures à rainure et à pénétration complète lorsqu'il est nécessaire de transférer la pleine résistance des pièces ou lorsque la charge est de nature dynamique. Dans ce type de soudure, il y a fusion du métal d’apport et du métal de base sur toute la profondeur du joint. Dans les joints bout à bout, l’épaisseur efficace d’une soudure à pénétration complète (aussi appelée gorge) est donc égale à l’épaisseur de la pièce la plus mince du joint. L’épaisseur efficace de la section d’une soudure est dénotée tw, quel que soit le type de soudure.

Si on exécute une soudure à pénétration complète d’un seul côté du joint, on utilise un support envers (ou latte de soutien), **constitué d’un matériau approuvé**, à la racine du cordon, **et on écarte les pièces à joindre pour obtenir une pénétration vraiment complète**. **Le support envers a pour but de retenir le métal en fusion.** Il peut être laissé en place si ce côté du joint n’est pas apparent. Le support envers est alors composé d’un alliage d’aluminium du même groupe que le métal de base.

**Figure 8.1 – Joints bout à bout avec soudures à rainure**

**Figure 8.2 – Joints en T et en coin avec soudures à rainure et soudures d’angle**

**Figure 8.3 – Joints à recouvrement avec soudures d’angle et soudures en bouchon ou en entaille**

## Diapositive 14 :

Il est parfois préférable d’exécuter les soudures à pénétration complète des deux côtés du joint, ce qui permet de réduire considérablement la quantité de soudure et d’obtenir une rainure avec une section doublement symétrique, de belle apparence. En atelier, il est généralement facile de souder des deux côtés parce qu’il est possible de retourner les pièces pour exécuter la soudure dans la position la plus convenable. Si on soude des deux côtés, on doit gouger la racine du premier cordon avant d’exécuter l’autre cordon de soudure. Dans ce type de joint, la préparation des bords demande beaucoup de soin puisque les pièces doivent être en parfait contact sur toute la longueur du joint (figure 8.1b). Il est aussi possible d’enlever les supports envers et de gouger la racine du cordon avant d’exécuter l’autre cordon de soudure. Dans ce cas, l’ouverture du joint est moins grande, le contact (accostage) des bords demande moins de précision et le support envers est généralement composé d’acier inoxydable, de céramique ou d’un ruban de fibre de verre (voir la figure 8.1a, voir acétate 13).

Lorsque les pièces n’ont pas à résister à des efforts significatifs, comme les pièces travaillant toujours en compression, par exemple, on peut utiliser des soudures à rainure à pénétration partielle. Dans ce cas, les forces à transmettre ne nécessitent pas la pleine pénétration, puisqu’une partie de ces forces est transmise par contact direct, si les surfaces en contact ont été usinées. Une soudure à pénétration partielle est une soudure dans laquelle la fusion ne s’effectue pas sur toute l’épaisseur du joint, tel qu’illustré sur la figure 8.1c. Typiquement, les soudures exécutées d’un côté sans support envers et les soudures exécutées des deux côtés sans subir le gougeage à l’envers sont comprises dans cette catégorie. Quoi qu’il en soit, **la norme S157 ne recommande pas l’utilisation d’assemblages avec soudures à rainure à pénétration partielle dans les joints devant résister à des efforts**. En ce sens, elle est moins permissive que d’autres normes.

Les règles de détails que doit satisfaire un joint avec soudures à rainure, pour être considéré comme qualifié, sont données dans la référence (8.4), pour les procédés de soudage décrits plus loin, à la section 8.3.

## Diapositive 15 :

Pour réaliser la continuité des pièces, les soudures d’angle sont moins efficaces que les soudures à rainure à pénétration totale, mais elles sont plus simples à exécuter. Ce type de soudure est très utilisé dans les assemblages de charpentes d’aluminium et il est généralement nécessaire d’effectuer des calculs pour déterminer la grosseur et la longueur du cordon de soudure d’angle à utiliser dans un joint.

Une soudure d’angle est exécutée entre deux surfaces formant un angle de 60 à 120° sans préparation des bords.

## Diapositive 16 et 17 :

Une soudure d’angle a une section théoriquement triangulaire, et ce triangle est habituellement un triangle isocèle (soudure d’angle standard), tel qu’illustré sur la figure 8.2c, voir acétate 16). La grosseur nominale d’une soudure d’angle, dénotée D, est égale à la longueur des côtés égaux du triangle isocèle.

Les soudures d’angle sont le plus souvent utilisées dans les joints en T (figure 8.2c) et les joints à recouvrement (figure 8.3a, voir acétate 17). On utilise parfois une soudure d’angle comme surépaisseur de soudure à rainure à pénétration partielle dans les joints en T (figure 8.2b, voir acétate 15).

## Diapositive 18 :

Il est parfois nécessaire de recourir à des soudures en bouchon ou en entaille pour résister aux charges dans les joints à recouvrement, tel qu’illustré sur la figure 8.3b (voir acétate). Les soudures en bouchon ou en entaille consistent en une soudure d’angle réalisée à l’intérieur d’un trou circulaire ou d’un trou oblong à coins arrondis, dont les rayons sont supérieurs ou égaux à l’épaisseur de la plaque perforée plus 5 mm. La soudure doit couvrir toute la périphérie du trou. La longueur efficace de la soudure d’angle incurvée doit être mesurée le long de l’axe de la gorge efficace, c’est-à-dire le long de la ligne médiane de la soudure d’angle standard, tel qu’illustré sur la figure 8.3b. Si cette pièce travaille en traction, il faut évidemment tenir compte de la présence de trous et calculer l’aire nette de la section.

Les trous entièrement remplis de soudure sont susceptibles de présenter des fissures de retrait. Par conséquent, les soudures en bouchons et les soudures en entailles de ce type ne sont pas recommandées pour résister aux forces calculées.

## Diapositive 19 :

Lorsque des soudures sont réalisées sur des surfaces arrondies, comme sur la figure 8.4 (voir acétate), on a ce qu’il est convenu d'appeler des soudures à rainure (ou sur préparation) à bords tombés.

Des équations pour le calcul de chacun des types de soudures montrés sur les figures 8.1 à 8.4 seront présentées dans les sections 8.2[[9]](#footnote-9), 8.5[[10]](#footnote-10) et 8.6[[11]](#footnote-11).

## Diapositive 21 :

**8.1.4 Procédés de soudage**

Il existe de nombreux procédés de soudage servant différentes fins. Pour les soudures structurales dans les charpentes d’aluminium, **on utilise presque exclusivement le soudage à l’arc sous gaz avec électrode réfractaire en tungstène (GTAW), le soudage à l’arc avec fil plein (GMAW), le soudage plasma (PAW) et le soudage des goujons** en utilisant les procédés de soudage à l’arc et de soudage avec décharge de condensateurs.

Le procédé GTAW (Gaz Tungsten Arc Welding) est communément appelé procédé TIG (Tungsten Inert Gaz) et le procédé GMAW (Gaz Metal Arc Welding) est aussi connu sous l’appélation MIG (Metal Inert Gaz). Ce sont les deux procédés les plus populaires. Le procédé PAW (Plasma Arc Welding) est moins utilisé alors que le soudage des goujons est une application particulière. Chacun de ces procédés fera l’objet d’une description assez détaillée, dans la section 8.2, pour le soudage des goujons, et dans la section 8.3[[12]](#footnote-12), pour les trois autres procédés.

Les autres types de procédés s’appliquent davantage à des situations particulières et sont, par conséquent, moins connus : soudage par faisceau d’électrons, soudage par faisceau laser, soudage par résistance, soudage par ultrasons, soudage par explosion, soudage par friction, soudage par étincelage, soudage à la molette et soudage par brasage.

Chacun de ces procédés fera l’objet d’une courte description dans la section 8.4[[13]](#footnote-13).

## Diapositive 23 :

**8.1.5 Positions de soudage**

La position dans laquelle le soudage est effectué est très importante du point de vue de la qualité et de la facilité d’exécution de la soudure ainsi que sur le plan économique.

Les quatre positions de soudage sont montrées sur la figure 8.5 (voir acétate).

**Le soudage à plat est la position qui offre le plus de facilité et de rapidité d’exécution au soudeur**.

En atelier, il est habituellement possible d’effectuer le soudage à plat ou à l’horizontale parce qu’on dispose d’appareils permettant de retourner les pièces à souder et de les placer dans la position la plus convenable.

Toutefois, il n’est pas toujours possible de souder à plat ou à l’horizontale, mais **il est préférable de réduire au minimum le soudage au plafond ou à la verticale**. Ces positions exigent une grande habileté de la part du soudeur, et le **temps requis pour réaliser une soudure est alors de deux à trois fois plus long que celui qui est requis pour réaliser la même soudure à plat**.

## Diapositive 25 :

**8.1.6 Représentation symbolique des soudures**

Comme il n’est pas facile d’indiquer clairement, sur un plan, le type de soudure requis et les dimensions du cordon, on utilise une représentation symbolique. Une liste complète des symboles utilisés est présentée dans la référence (8.4). Les symboles montrés sur la figure 8.6 (voir acétates 25 et 26) sont parmi les plus courants.

Le symbole complet se compose d’une flèche pointant en direction du joint à souder, d’une ligne de référence généralement horizontale et d’un petit symbole placé au-dessous, au-dessus ou des deux côtés de la ligne de référence et indiquant le type de soudure voulu. Si le petit symbole est placé sous la ligne de référence, la soudure est requise du côté indiqué par la flèche. S’il est placé des deux côtés de la ligne de référence, la soudure doit être exécutée sur les deux lignes délimitant la surface de contact, c’est-à-dire sur celle qui est indiquée par la flèche et sur celle du côté opposé.

Le procédé, le contournement de la soudure ou tout autre indication sont présentés dans la queue de la ligne de référence (figure 8.6a – acétate 25). On omet la queue lorsqu’aucune indication n’est donnée.

Pour une soudure d’angle, le symbole utilisé est un triangle rectangle isocèle. Le chiffre placé à gauche du triangle donne la grosseur nominale du cordon (D) en mm, et celui qui est placé à droite donne la longueur du cordon (L) en mm (figure 8.6a). Si la soudure doit être exécutée sur toute la longueur du joint, on peut omettre le chiffre à droite du triangle (figure 8.6b – acétate 25).

## Diapositive 26 :

Pour les soudures à rainure, le symbole représente le type de préparation. Dans un joint bout à bout, si une seule pièce doit être chanfreinée, la flèche est brisée et pointe vers cette pièce. Un rectangle placé au-dessus du symbole indique qu’il faut prévoir un support envers. Il faut également préciser l’angle de la préparation, la profondeur de la pénétration et l’ouverture à la racine du cordon (figure 8.6c – acétate 26). Le fait de ne pas indiquer la profondeur de la pénétration ni la gorge entre parenthèses, sous la ligne de référence, à gauche du symbole, indique qu’on exige un joint à pénétration complète.

Un cercle placé à la jonction de la flèche et de la ligne de référence signifie que la soudure doit être exécutée sur tout le contour de la surface de contact. Un petit drapeau noir placé à cette jonction indique une soudure réalisée sur le chantier (figure 8.6f – voir acétate 26).

## Diapositive 28 :

**8.1.7 Classification des assemblages soudés**

Comme les boulons, les soudures sont soumises à des contraintes de traction, de cisaillement ou à une combinaison des deux, selon la position des soudures dans l’assemblage par rapport aux efforts transmis. Il est possible de classifier les assemblages soudés selon les efforts transmis aux soudures d’angle.

Dans les assemblages avec soudures à rainure, les soudures sont soumises aux mêmes efforts que les plaques assemblées et l’effort est généralement concentrique.

Il n’est donc pas nécessaire d’établir une classification des assemblages soudés avec soudures à rainure. Par contre, pour les assemblages avec soudures d’angle, cette classification est essentielle pour le calcul des soudures. Elle est établie en considérant le plan de contact des pièces assemblées, c’est-à-dire le plan qui contient la surface de contact de ces pièces, et en considérant le plan d’action de l’effort qui sollicite l’assemblage soudé.

Dans les joints à recouvrement, le plan d’action de l’effort sollicitant le joint est parallèle au **plan de contact**. Dans les joints en T, le plan d’action de l'effort est souvent perpendiculaire au plan de contact, mais il peut également être incliné. Dans ces deux types de joints, si la ligne d’action de l’effort passe par le centre de gravité de la soudure d’angle, on a un assemblage soudé concentrique (figure 8.7a – voir acétate 28).

Dans un joint à recouvrement, si la ligne d’action de l’effort (Pf) est excentrée par rapport au centre de gravité de la soudure, la soudure est soumise à un effort tranchant (Pf) et à un couple de torsion ($P\_{f}e$). On a alors un assemblage soudé excentrique en torsion (figure 8.7b – voir acétate 28). Si on a les mêmes conditions dans un joint en T, la soudure d’angle est soumise à un effort tranchant (Pf) et à un moment fléchissant ($P\_{f}e$). On a alors un assemblage soudé excentrique en flexion. Le moment fléchissant peut alors agir dans le plan x – y (figure 8.7c – voir acétate 29) ou dans le plan y – z (figure 8.7d – voir acétate 29).

Pour le calcul de la soudure d’angle dans les assemblages concentriques, on peut tenir compte du fait que les cordons frontaux ont une plus grande résistance que les cordons latéraux, comme on le verra à la section 8.6. Si on néglige ce surplus de résistance, l’orientation du plan d’action de l’effort par rapport au plan de contact n’a pas d’importance dans les assemblages soudés concentriques.

Par contre, pour le calcul de la soudure d’angle dans les assemblages excentriques, cette orientation a une grande importance. La torsion et la flexion sont, en effet, traitées différemment, ce qui est assez évident puisque, dans ce cas de la flexion dans le plan x – y, par exemple, il y a butée des pièces en contact (figure 8.7c).

Chacun de ces types d’assemblages sera étudié dans les sections qui suivent.

# Conception des assemblages soudés

## Diapositive 32 :

**8.2 Conception des assemblages soudés**

**8.2.1 Caractéristiques du soudage de l’aluminium**

Il existe un certain nombre de facteurs qui caractérisent l’aluminium et qu’il convient de prendre en compte lorsqu’on prévoit souder des pièces en aluminium. La plupart ont été étudiés dans les chapitres précédent (voir la sous-section 8.1.1), mais à cette étape-ci, il est approprié d’en dresser la liste.

* Tous les alliages d’aluminium possèdent un film d’oxyde très dur qui se forme rapidement, lorsque la surface d’aluminium est exposée à l’air (voir la sous-section 2.13.2[[14]](#footnote-14)). Puisque cette couche possède un point de fusion beaucoup plus élevé que celui de l’aluminium (2000°C, comparé à 660°C) elle crée des manques de fusion, tel qu’illustré sur la figure 2.41c[[15]](#footnote-15). De plus, puisqu’elle est poreuse, elle peut absorber de la graisse et de l’humidité et, au soudage, l’hydrogène contenu dans ces substances crée de la porosité. Par conséquent, il est impératif d’enlever la couche d’oxyde ou de la briser par des moyens mécaniques ou chimiques avant de souder l’aluminium.
* L’aluminium possède une conductibilité thermique et une conductivité électrique qui sont environ quatre fois plus élevées que celles de l'acier (voir la section 2.8[[16]](#footnote-16)). Par conséquent, un apport de chaleur plus élevé est requis pour le soudage par fusion de l’aluminium, comparé à l’acier, et le soudage par résistance nécessite plus de courant (voir la sous-section 2.13.2).
* Le pouvoir réflecteur de l’aluminium est tel que ce dernier ne change pas de couleur lorsqu’il approche le point de fusion, contrairement à l’acier (voir la section 2.15[[17]](#footnote-17)). Par conséquent, pour le soudeur, le critère de détermination de l’approche du point de fusion de l’aluminium est différent de celui de l’acier.
* Puisque l’aluminium est non magnétique, le soufflage de l’arc (<https://www.soudeurs.com/site/qu-est-ce-que-le-soufflage-magnetique-de-l-arc-electrique-de-soudage-367/> ) se trouve éliminé au soudage (voir la section 2.15). Par contre, l’inspection des soudures par magnétoscopie n’est pas possible. Les procédés de soudages à l’arc électrique restent les plus largement utilisés en fabrications soudées. La nature de l’arc électrique rend celui-ci particulièrement sensible aux champs magnétiques. Les forces électromagnétiques créées par ces champs peuvent être à l’origine de la déflexion et de l’instabilité de l’arc jusqu'à, dans certaines conditions, éteindre l’arc électrique. Ce phénomène complexe et imprévisible est connu dans l’industrie sous le terme « soufflage magnétique de l’arc ». Il est rencontré surtout sur des matériaux magnétisables, lors de soudage en fond de chanfrein, en angle et sur les extrémités de pièces de longues dimensions comme les gazoducs. Il peut être la cause d’apparition de nombreux défauts et même rendre impossible la réalisation de l’assemblage. Les conséquences techniques et économiques de l’apparition d’un tel phénomène peuvent être particulièrement lourdes.
* Le coefficient de dilatation thermique de l’aluminium est deux fois plus élevé que celui de l’acier. Par contre, son point de fusion est deux fois plus bas. Ainsi, lors du soudage, les déformations de l’acier et de l’aluminium sont pratiquement équivalentes (voir la sous-section 2.13.6).
* Contrairement à l’acier, la chaleur induite par le soudage a pour effet de diminuer de façon significative les propriétés mécaniques de l’aluminium dans la région de la soudure. Cet important aspect a été examiné en détail à la section 2.6.
* La résistance d’un assemblage soudé dépend du type de soudure, des propriétés mécaniques du métal d’apport, des propriétés mécaniques et de la soudabilité du métal de base, et de la qualité d’exécution de la soudure. On a déjà souligné l’importance de la qualité d’exécution, laquelle dépend de la compétence du soudeur, de la position de soudage, de la préparation des surfaces, de la séquence d’exécution des soudures et des conditions environnantes (voir les sous-sections 2.13.4, 2.13.7 et 2.13.8).
* La préparation des surfaces comprend non seulement la réalisation de chanfreins sur les pièces dans le cas de soudure à rainure, mais aussi le nettoyage des surfaces. Les surfaces à souder doivent être maintenues sèches et exemptes de tout produit susceptible de réduire la qualité des soudures (voir la sous-section 2.13.2).
* La préparation des surfaces comprend également dans certains cas, le préchauffage et/ou le postchauffage des joints (traitement thermique), pour éviter la fissuration, minimiser la distorsion due au retrait et chercher à améliorer les propriétés mécaniques de certains alliages soudés (voir les sous-sections 2.13.5, 2.13.6 et 2.13.9).

L’opération de soudage engendre des contraintes résiduelles qui résultent, d’une part, du retrait du métal fondu lors de son refroidissement et, d’autre part, de l’anisothermie qui caractérise l’opération. Les contraintes résiduelles de traction dans la soudure et de compression dans le métal de base non fondu sont inévitables. Toutefois, les effets de ces contraintes peuvent être minimisées, entre autres par le préchauffage et/ou le postchauffage des joints, **dans le cas de joints requérant de grandes quantités de métal d’apport (soudures à rainure ou soudures d’angle de dimensions importantes).** Pour les joints de moindres dimensions, on peut définir une séquence d’exécution des soudures telle que le soudage est exécuté de façon quasi symétrique par rapport au centre de gravité de l’ensemble des soudures. L’expérience du fabricant peut lui permettre de définir d’autres mesures compensatrices des effets du retrait.

* Enfin, il existe certaines règles pratiques de conception des structures soudées qu’il importe de toujours chercher à appliquer. La première règle consiste à placer les soudures (souder aux endroits) dans les zones non sollicités (à l’axe neutre ou aux points d’inflexion, par exemple), tel qu’illustré pour des caissons sur la figure 2.6e. Si toutes les soudures sont conformes à l’un de ces cas, elles seront soumises presque uniquement à des efforts de cisaillement et, puisqu’elles sont de faibles dimensions, elles n’affaibliront que peu la résistance totale des pièces assemblées. Si une telle soudure ne peut être réalisés, l’affaiblissement qui en résulte peut être compensé par l’ajout d’une plaque de renforcement.

La deuxième règle consiste à utiliser plutôt des soudures bout à bout que des soudures d’angle, pour des raisons qui deviendront évidentes plus loin dans ce chapitre. Les soudures à rainure à pénétration totale présentent, en effet, une meilleure tenue à la fois en statique et en fatigue.

Dans une poutre en treillis, un élément tubulaire ne peut être soudé directement à un autre sans qu’un cordon de soudure transversal à l’un ou l’autre élément soit créé. Lorsque la contrainte est faible, comme dans les éléments comprimés élancés, cet assemblage est acceptable; mais dans le cas d’ossatures soumises à des contraintes élevées, il est nécessaire d’utiliser des goussets disposés dans le plan du treillis afin de pouvoir réaliser la liaison de tous les éléments aboutissant à un nœud à l’aide uniquement de cordons de soudure longitudinaux.

## Diapositive 33 :

On trouve, dans la norme W59.2, une description détaillée des dispositions constructives relatives au soudage par fusion de l’aluminium. Celles qui concernent les soudures à rainure, les soudures d’angle, les cales et les goujons sont traitées en détail dans le présent chapitre. Le lecteur devra consulter la norme pour obtenir un complément à l’information déjà présenté dans ce chapitre ainsi que dans le chapitre II, sur les sujets suivants :

* les matériaux d’apport;
* la préparation des bords;
* le nettoyage des surfaces avant le soudage;
* les tolérances et les méthodes d’assemblage;
* le contrôle de la déformation et des contraintes dues au soudage;
* le retrait;
* la terminaison des soudures;
* la réparation des défauts;
* la correction des déformations;
* les critères d’acceptation des discontinuités dans les assemblages soudés;
* l’inspection du soudage;
* le renforcement et la réparation des structures existantes.

## Diapositive 35 :

**8.2.2 Soudures d’angle**

Une soudure d’angle a une section théoriquement triangulaire, comme on l’a vu précédemment, et ce triangle est habituellement un triangle isocèle (soudure d’angle standard). La grosseur nominale d’une soudure d’angle, dénotée D, est égale à la longueur des côtés égaux du plus grand triangle isocèle qu’on peut placer à l’intérieur de la section réelle du cordon (figure 8.8a – voir acétate).

L’épaisseur efficace d’une soudure d’angle (tw), aussi appelée **gorge efficace**, est la distance la plus courte entre la racine du cordon et l’hypoténuse de la section triangulaire théorique. Elle est donc mesurée sur une droite perpendiculaire à l’hypoténuse et reliant la racine à l’hypoténuse. Pour une soudure d’angle standard, cette droite fait un angle de 45° avec les côtés du triangle. Ainsi,

$t\_{w}=0.707D$ (8.1)

Si on utilise une soudure d’angle avec côtés inégaux, ce qui est peu fréquent (figure 8.8b – voir acétate), la section théorique du cordon est celle du plus grand triangle rectangle qu’on peut placer à l’intérieur de la section réelle du cordon. Dans ce cas, on peut calculer l’épaisseur efficace avec l’équation suivante :

$t\_{w}=\frac{D\_{1}D\_{2}}{\sqrt{D\_{1}^{2}+D\_{2}^{2}}}$ (8.2)

## Diapositive 36 :

Si les pièces à raccorder par les soudures d’angle ne sont pas perpendiculaires les unes aux autres, la section du cordon de soudure d’angle n’est pas un triangle rectangle. Dans ce cas, la gorge efficace dépend de l’angle (θ) et de l’écartement (g) entre les pièces, définis sur la figure 8.8c (voir acétate). On calcule tw à l’aide de l’équation suivante :

$t\_{w}=\frac{D-g}{2 sin⁡({θ}/{2})}$ (8.3)

L’angle d’intersection des pièces peut varier entre 60 et 120°. **Si cet angle est supérieur à 120°, on ne peut pas considérer que la soudure d’angle est structurale**, c’est-à-dire qu’on ne peut pas admettre que la soudure transmet un effort. Dans le cas d’un angle inférieur à 60°, la soudure d’angle est généralement utilisée comme renfort avec une soudure à rainure à pénétration partielle (voir la figure 8.2b (voir acétate 15) et la sous-section 8.2.4[[18]](#footnote-18)). **On rencontre cette combinaison de soudures dans les treillis à sections tubulaires**.

## Diapositive 37 :

Pour les soudures d’angle, étant donné que la quantité de soudure augmente comme le carré de la grosseur nominale du cordon, alors que la résistance augmente linéairement avec la grosseur nominale, il est plus économique de choisir un long cordon ayant une grosseur nominale faible, plutôt que l’inverse. Il faut toutefois tenir compte de l’épaisseur des pièces jointes. Si la pièce jointe est trop épaisse par rapport à la soudure d’angle, le refroidissement de la soudure sera rapide, ce qui peut produire des fissures de retrait. Comme il est indiqué sur la figure 8.9a, la grosseur minimale d’une soudure d’angle dépend de la plus épaisse des pièces à joindre. On retient la plus petite des trois valeurs de D indiquées sur la figure. La première ($D\_{min}=t\_{2}$) ne contrôle que lorsque t2 est très petit ($t\_{2}\leq 3mm$). Les soudures d’angle de grosseur minimale doivent être exécutées en une seule passe.

Compte tenu de l’espace disponible et de l’arrangement géométrique des cordons de soudure, il n’est pas toujours possible de choisir une soudure d’angle de dimension minimale. Comme il est indiqué sur la figure 8.9b, la grosseur maximale d’une soudure d’angle dépend de l’épaisseur de la pièce dont le bord est soudé.

La longueur d’un cordon de soudure ne doit pas être inférieure à cinq fois la grosseur nominale du cordon ($L \geq 5 D$). S’il n’est pas possible de satisfaire cette règle, la grosseur nominale du cordon à considérer dans les calculs est égale au quart de la longueur du cordon (figure 8.9c).

**Figure 8.9 – Grosseur nominale d’une soudure d’angle (voir acétate)**

## Diapositive 38 :

La longueur efficace (Lm) d’une soudure d’angle doit être la longueur totale de la soudure (L), y compris les contournements, moins une longueur D à chaque extrémité.

$L\_{m}=L-2D$ (8.4)

On tient ainsi compte des imperfections de la soudure aux extrémités du cordon (voir la figure 2.47[[19]](#footnote-19) à la sous-section 2.13.4, ainsi que la section 8.3).

La norme S157est légèrement plus libérale puisqu’elle recommande de soustraire deux fois la gorge efficace (tw) de la longueur totale du cordon de soudure d’angle.

$L\_{m}=L-2t\_{w}$ (8.5)

Il est recommandé de prolonger les soudures d’angle autour des coins sur une longueur au moins égale à une fois la grosseur du cordon (figure 8.6a – voir acétate 25) et de ne pas considérer la longueur du contour dans les calculs. Si les contournements ne sont pas exécutés, les équation (8.4) ou (8.5) s’appliquent.

La section efficace ou critique d’un cordon de soudure d'angle, dénotée Aw, est une section rectangulaire dont l’aire est égale à la gorge (ou épaisseur) efficace multipliée par la longueur efficace du cordon (figure 8.10) :

**Figure 8.10 – Section efficace et surfaces de fusion (voir acétate)**

La surface de fusion, dénotée Am, est la surface du métal de base qui est fondue durant le soudage. Si la soudure d’angle a deux côtés égaux, la surface de fusion dans chacune des pièces jointes est égale à la grosseur nominale du cordon multipliée par la longueur efficace du cordon :

$$A\_{m}=DL\_{m}$$

L’axe d’un cordon de soudure d’angle est une ligne perpendiculaire à la section triangulaire du cordon et parallèle à la longueur du cordon. Ces définitions sont utilisées à la section 8.6[[20]](#footnote-20) pour le calcul de la résistance pondérée de la soudure d’angle et du métal de base.

## Diapositive 40 :

Les cales peuvent être utilisées pour le raboutage de pièces d’épaisseur différentes ou sur des assemblages où, en raison d’un alignement géométrique existant, des décalages doivent être compensés pour faciliter le raccordement.

Une cale d’épaisseur égale ou inférieure à 5 mm ne doit pas servir à transmettre un effort, mais elle doit être au même niveau que les bords soudés de la pièce soumise à l’effort. Les dimensions des soudures le long de ces bords doivent être égales à la dimension requise plus la valeur et l’épaisseur de la cale, tel qu’illustré sur la figure 8.11a8.4.

## Diapositive 41 :

Une cale d’épaisseur supérieure à 5 mm doit se prolonger au-delà des bords de la pièce de raccord (aussi appelée couvre-joint) et être soudée à la pièce sur laquelle elle est placée. Les soudures réunissant la pièce de raccord à la cale et les soudures réunissant la cale à la pièce sur laquelle elle est placée doivent être conçues pour transmettre les efforts à la pièce de raccord ou aux pièces à raccorder. Certaines conditions limites à respecter sont indiquées sur la figure 8.11b (voir acétate).

Un exemple de calcul est présenté à la sous-section 8.10.3[[21]](#footnote-21).

## Diapositive 43 :

**8.2.4 Soudures à rainure**

Si on utilise une soudure à rainure à pénétration complète pour joindre bout à bout deux plaques d’épaisseur ou de largeur différentes, **on doit chanfreiner les pièces**, tel que montré à la figure 8.12 (voir acétate). L’épaisseur de la gorge efficace (tw) à considérer pour la soudure est égale à l’épaisseur de la pièce la plus mince.

S’il peut être démontré que l’utilisation de joints à pénétration partielle est justifiée, il faut prendre en considération les données présentées aux tableaux 8.1 (voir acétate 46) et 8.2 (voir acétate 47) pour la conception et le calcul de la résistance du joint.

## Diapositive 45 :

La gorge efficace minimale d’une soudure à rainure à pénétration partielle pour les assemblages bout à bout, en L ou en T, dépend de l’épaisseur de la plaque ou de la tôle et doit être conforme au tableau 8.1 (voir acétate 46). Des exemples de soudures à rainure à pénétration partielle sont présentés sur la figure 8.13 (voir acétate).

La profondeur de la préparation des soudures à pénétration partielle, requise pour obtenir la gorge efficace exigée, doit être conforme au tableau 8.2 (voir acétate 47).

La profondeur de la préparation d’une soudure à rainure simple ou double à pénétration partielle, combinée à une soudure d'angle (figure 8.13d), doit être telle que la gorge de la soudure combinée n’est pas inférieure à celle qui est obtenue en utilisant les données du tableau 8.1 pour les soudures à rainure ou celles de la figure 8.9a (voir acétate 37) pour les soudures d’angle.

Dans le cas des assemblages en T ou en L, l’épaisseur de la gorge efficace (tw) d’une soudure à pénétration partielle renforcée ou non par une soudure d’angle (figures 8.13c et d) doit être égale à la plus courte distance entre la racine du chanfrein et la surface de la soudure moins 3 mm, lorsqu’une telle réduction est exigée en vertu du tableau 8.2 ($t\_{w} ou t\_{w}-3mm$).

## Diapositive 46 :

**Tableau 8.1 – Gorge efficace minimale des soudures à rainure à pénétration partielle**

## Diapositive 47 :

**Tableau 8.2 – Profondeur de la préparation des soudures à pénétration partielle**

## Diapositive 48 :

Les procédures pour exécuter les soudures entre les sections courbes et entre les sections courbes et les plaques (figure 8.4 – voir acétate 19) doivent être élaborées par l’entrepreneur. La dimension du cordon de soudure qu’on désire obtenir doit être déterminée à l’aide de soudures types. Dans le cas du calcul de la résistance, la gorge efficace (tw) est la plus courte distance mesurée entre la racine et la surface de la soudure (t’, sur la figure 8.14 – voir acétate), sans tenir compte de toute convexité de la surface soudée, moins la plus petite des valeurs suivantes : 20 % de cette distance ou 3 mm. Ainsi, tw est la plus grande des valeurs suivantes :

$t\_{w}=0.8t^{'}$ (8.9)

$t\_{w}=t^{'}-3mm$ (8.10)

## Diapositive 50 :

**8.2.5 Goujons**

Pour relier une pièce en aluminium par boulonnage à une autre pièce qu’on ne peut ou qu’on ne désire par perforer, il est possible d’utiliser des goujons en aluminium.

Un goujon est essentiellement une tige fabriquée dans les alliages étirés à froid ou extrudés. Certains modèles sont entièrement filetés, d’autres le sont partiellement et quelques-uns présentent, en plus, une portion cylindrique protubérante. Il existe un grand choix de goujons pour de nombreuses applications particulières. Un exemple de goujon est présenté sur la figure 8.15 (voir acétate).

**Figure 8.15 – Exemples de goujons en aluminium posés par soudage à l’arc**

## Diapositive 51 :

Pour la pose des goujons, on utilise généralement des procédés automatiques, mais il est aussi possible de souder les goujons manuellement à l’aide de soudure d'angle. Les principaux procédés sont les suivants:

* le soudage à l’arc sur des éléments en aluminium à l’aide d’une machine à souder automatique spécialement conçue pour la pose des goujons (procédé SW pour « arc Stud Welding »);
* le soudage avec décharge de condensateur à l’aide d’un équipement transportable, spécialement conçu à cet effet, et selon l’une ou l’autre de trois méthodes (avec contact à l’amorçage, avec écartement à l’amorçage ou avec amorçage par contact et retrait);
* le soudage manuel par des soudures d’angles, en utilisant le procédé GMAW, GTAW ou PAW définis à la sous-section 8.1.4.

Le soudage à l’arc permet la pose très rapide de goujons dont les diamètres varient entre 5 et 13 mm (3/16 et ½’’). À la base du goujon, une portion du métal fondu forme un anneau qui s’apparente à une soudure d’angle, mais qui n’en est pas une. La longueur du goujon est réduite d’environ 3 mm lors du soudage. Puisque la pose s’effectue à l’aide d’une virole en céramique thermorésistante pour protéger l’arc, la forme et les dimensions de l’anneau de métal fusionné sont bien contrôlées. Des dimensions caractéristiques sont présentées sur la figure 8.15b (voir acétate 50). La figure 8.16 (voir acétate 52) illustre quelques méthodes permettant de tenir compte de la présence des anneaux de soudure lors de la réalisation des assemblages.

Les alliages les plus utilisés **pour le soudage à l’arc** des goujons sont les alliages 4043, 5183, 5356 et 5556. On remarque que les alliages couramment utilisés comme métal d’apport pour le soudage (4043 et 5356) sont aussi utilisés pour la fabrication des goujons.

Les propriétés mécaniques du tableau 2.9[[22]](#footnote-22) peuvent donc être utilisées directement pour les différents alliages constituant la plaque de base sur laquelle les goujons sont soudés.

Pour les goujons soudés par décharge de condensateur, le volume de métal fusionné selon l’une ou l’autre des trois méthodes identifiées précédemment est presque négligeable. La réduction de longueur des goujons est de l’ordre de 0,20 à 0,38 mm. En raison du court cycle de soudage, les zones affectées thermiquement qui caractérisent le soudage à l’arc sont présentes, mais petites. Ce sont les raisons pour lesquelles le procédé de soudage par décharge de condensateur ne permet la pose que de petits goujons dont les diamètres varient entre 2 et 8 mm.

Le choix d’alliages pour les goujons pouvant être **soudés par décharge de condensateur** est plus grand que dans le cas précédent. Les alliages d’aluminium les plus recommandés sont les alliages 1100, 4043, 5183, 5356, 5556, 6061 et 6063.

Au choix de l’entrepreneur et sous réserve de l’autorisation de l’ingénieur, les goujons peuvent être assemblés par des soudures d’angle en utilisant l’un ou l’autre **des procédés GMAW, GTAW et PAW**. La dimension minimale de la soudure d’angle doit alors être de 5 mm pour les goujons de 6 à 10 mm, et de 6 mm pour des goujons de 10 à 13 mm de diamètre. La base du goujon doit être plate. La référence (8.6[[23]](#footnote-23)) recommande tout simplement que la gorge efficace de la soudure d’angle soit au moins égale au tiers du diamètre du goujon ($t\_{w}\geq {d}/{3}$).

Quelle que soit la méthode utilisée pour le soudage, on doit également procéder à des essais de traction ou de pliage des goujons pour vérifier leur résistance. Les essais de résistance à la traction directe sont recommandés lorsque le calcul est basé sur la résistance maximale à la traction de la soudure (Fwu), ce qui est le cas pour la référence (8.6), comme on le verra à la section 8.5[[24]](#footnote-24).

Les références (8.4), (8.5) et (8.8) contiennent une série de recommandations pour la pose, la qualification et les réparations ou le remplacement des goujons soudés, qui apportent un complément à l’information présentée dans cette sous-section.

## Diapositive 52 :

La figure 8.16 (voir acétate) illustre quelques méthodes permettant de tenir compte de la présence des anneaux de soudure lors de la réalisation des assemblages.

# Procédés de soudage à l’arc

## Diapositive 55 :

**Gaz**-**inerte**s: Ils sont appelés aussi **gaz rares** ou **gaz** **nobles**. Ils font partie d'un groupe de 6 éléments chimiques constituant le groupe 0 (colonne 18) du tableau périodique. Ce sont l'hélium (He), le néon (Ne), l'argon (Ar), le krypton (kr), le xénon (Xe) et le radon (Rn)[[25]](#footnote-25)

Les **métaux réfractaires** sont une classe de métaux qui sont extrêmement résistants à la chaleur et à l'usure. La définition des éléments qui appartiennent à ce groupe peut varier. Avec la définition la plus courante, ce groupe comprend 5 éléments, deux de la cinquième période, le **niobium** et le **molybdène**, et trois de la sixième période, le **tantale**, le **tungstène** et le **rhénium[[26]](#footnote-26)**

**8.3 Procédés de soudage à l’arc**

Puisque les procédés de soudage les plus couramment utilisés en construction sont les procédés à l’arc GTAW, GMAW et PAW (sous-section 8.1.4), il convient de les étudier un peu plus en détail que les autres procédés de soudage (section suivante).

**8.3.1 Soudage avec électrode réfractaire (GTAW)**

Dans ce procédé, on produit un arc électrique entre une électrode réfractaire en tungstène et la pièce à souder, pendant qu’un jet de gaz inerte entourant l’électrode, généralement de l’argon, de l’hélium ou un mélange des deux gaz, protège le bain de fusion contre l’oxydation. Une baguette d’apport, tenue à la main, nourrit le bain de fusion, lorsqu’un métal d’apport est requis. Une illustration de l’équipement généralement utilisé pour le soudage à l’arc avec électrode réfractaire en tungstène est présentée sur la figure 8.17 (voir acétate).

Alors que les postes pour le soudage des aciers inoxydables sont à courant continu, ceux qui sont utilisés pour le soudage des alliages d’aluminium ont une source de courant alternatif pour le décapage et la fusion du métal. Une source de courant HF se superpose au courant de soudage pour assurer l’amorçage de l’arc à chaque alternance. L’alternance positive assure la pénétration et le refroidissement de l’électrode.

Le procédé GTAW convient pour des épaisseurs comprises entre 1 et 6 mm. Il peut être automatisé, mais difficilement robotisé.

Il existe une version dans laquelle l’hélium est le gaz protecteur. L’hélium permet d’obtenir une température élevée dans l’arc électrique. Il faut disposer d’une source de courant continu à polarité directe. La fonction de décapage est réduite mais l’énergie de soudage est plus importante. Cela permet de souder en une seule passe des produits dont l’épaisseur est de l’ordre de 10 à 12 mm. Ce procédé est toutefois réservé au soudage automatique à cause de la difficulté de maintenir la hauteur d’arc à une valeur constante et inférieure à 0,5 mm.

La version manuelle du procédé, avec métal d’apport sous forme d’une baguette tenue à la main et amenée dans le bain de fusion, permet la réalisation de soudures de petites dimensions, de soudures circulaires et de produits de faible épaisseur. La version automatique est intéressante puisqu’elle permet le soudage de pièces en série et, en particulier, lorsque l’accès à l’envers de la soudure est impossible. Le transfert du fil d’apport se fait automatiquement à partir d’une bobine, comme pour le soudage GMAW.

## Diapositive 57 :

**8.3.2 Soudage avec électrode consommable (GMAW)**

Dans ce procédé, un fil d’alliage d’aluminium sert à la fois d’électrode et de métal d’apport. Préalablement enroulé sur une bobine, le fil se déroule automatiquement jusqu’à l’outil de soudage (pistolet ou torche) au fur et à mesure de sa consommation. L’équipement généralement utilisé pour le soudage à l’arc sous gaz avec fil plein est montré sur la figure 8.18 (voir acétate).

L’énergie de soudage est fournie par une source de courant continu (courant lisse). Le branchement est effectué en polarité inverse (le moins à la pièce) pour assurer à la fois le décapage de la couche d’alumine et la fusion du fil électrode.

La réoxydation est empêchée par un écran de gaz inerte, comme pour le procédé GTAW. Le procédé GMAW, utilisé en courant lisse, permet le soudage de produits dont l’épaisseur est supérieure à 2,5 mm.

Dans sa version manuelle, aussi appelée semi-automatique, le procédé GMAW est certainement le procédé de soudage la plus utilisé. En effet, il permet d’obtenir des soudures de très bonne qualité tout en ayant un rapport qualité/coût très performant. Il est utilisé pour toutes les soudures à trajectoire complexe, lorsque les dimensions et les épaisseurs des produits sont compatibles avec le procédé et lorsque l’automation ne se justifie pas du point de vue de la rentabilité.

Le procédé GMAW peut facilement être automatisé ou robotisé. Le soudage automatique est réservé aux soudures linéaires, de grande longueur où une installation automatique est rentable. Il assure une qualité de soudage reproductible. Bien entendu, il faut que les paramètres soient parfaitement définis au préalable.

<https://www.members.tripod.com/rboivin/pulse.htm>

**SOUDAGE AVEC COURANT PULSÉ**

En sondage GTAW conventionnel, l'arc a tendance à s'élargir en forme de cloche, ce qui tend à élargir le bain de fusion plutôt qu'à augmenter la profondeur de la soudure. Toutefois, si l'arc est appliqué sur un bain de fusion solidifié, ou partiellement solidifié, on obtient une meilleure pénétration. Le soudage GTAW à courant pulsé, identifié par l'abréviation GTAW-P, permet de produire cette solidification du bain de fusion durant le sondage grâce à des variations de l'intensité de l'arc.

**Principe de l'arc pulsé**

Les appareils de soudage à courant continu peuvent produire un arc pulsé. Il s'agit d'un procédé par lequel l'intensité du courant de soudage passe, à intervalles réguliers, d'un niveau élevé (peak) à un niveau bas (background). Le soudage s'interrompt donc périodiquement. Lorsque l'intensité est élevée, le bain de fusion se forme, puis, lorsqu'elle atteint son niveau bas, le bain de fusion se solidifie et on évite ainsi l'effondrement du métal de base. Le soudage s'effectue donc par impulsions répétées, ce qui crée des points de soudure. Lorsque ces points se recouvrent suffisamment, on obtient un joint uniforme et continu.

Pendant le passage du courant par ses valeurs minimales, le gaz de protection continue à s'écouler, contribuant ainsi au refroidissement de la soudure. Le soudage avec du courant pulsé est donc considéré comme un procédé de soudage plus froid que le soudage conventionnel.

## Diapositive 58 :

Pour le procédé GMAW, il existe trois systèmes de déroulement du fil :

* fil poussé, système par lequel le fil est poussé dans une gaine flexible, depuis le bloc-dévidoir jusqu’à la torche, par l’intermédiaire de deux galets à serrage réglable (figure 8.18 – voir acétate 57);
* fil tiré, système par lequel le fil est tiré dans sa gaine, à partir du pistolet; le système d’entraînement peut être pneumatique;
* fil poussé-tiré, système qui est une combinaison des deux dispositifs précédents il implique un bon synchronisme des systèmes d’entraînement.

En principe, les procédés tiré et poussé-tiré équipent les pistolets alors que le système poussé est plutôt réservé aux torches. Les appareils de type fil poussé réduisent au maximum l’encombrement et le poids du pistolet (ou de la torche) qui devient ainsi d’une grande maniabilité. Mais leur utilisation n’est possible que pour des fils de faible section$<1.6mm$) et des gaines courtes (figure 8.18). Dans les systèmes poussés, les fils mous (1050, 4043) sont sensibles au bouclage dans les galets d’entraînement. C’est pour cette raison qu’on préférera les systèmes tiré ou poussé-tiré lorsque l’accessibilité aux pièces est bonne. On notera que seules les torches à fil poussé peuvent équiper les robots et les postes synergiques.

La facilité de dévidage et la qualité de fabrication des fils sont des paramètres qui ont une influence sur la bonne exécution de la soudure.

Bien qu’il n’y ait pas de limite supérieure aux épaisseurs pouvant être soudées à l’aide de la torche, on préfère, pour des raisons économiques, utiliser le pistolet pour des épaisseurs supérieures à 8 mm.

## Diapositive 60 :

**8.3.3 Soudage plasma**

Le procédé PAW est semblable au procédé GTAW à l’exception de l’arc qui est réduit en dimension par un bec refroidi à l’eau. La réduction de la dimension de l’arc a pour effet d’augmenter la densité d’énergie, la stabilité directionnelle et le foyer de l’arc plasma. Une des deux techniques de soudage plasma permet la soudure de pièces très épaisses.

Ce procédé utilise une source de courant continu et il n’y a pas de décapage de la couche d’alumine par l’arc, comme dans le procédé GTAW. Les surfaces à souder doivent donc être nettoyées au préalable par d’autres moyens. Toutefois, il existe des techniques de soudage plasma qui permettent le nettoyage par l’arc.

Une pénétration plus profonde et une plus grande rapidité de soudage sont les principaux avantages de la soudure plasma, si on la compare à celle du procédé GTAW. Il faut toutefois prendre des dispositions spéciales pour minimiser la porosité de la soudure.

## Diapositive 62 :

Plusieurs facteurs caractérisent les deux procédés de soudage. Ceux qui suivent sont les principaux facteurs qui peuvent guider le choix du procédé:

* **l’épaisseur des pièces à souder**

 Le procédé GTAW est mieux adapté au soudage des tôles minces alors que le procédé GMAW permet le soudage de plaques épaisses. Les deux procédés se valent pour des épaisseurs variant entre 1,5 et 8,0 mm.

* **l’apparence**

 Même si l’apparence dépend surtout de la qualité de la préparation avant le soudage et de l’habileté du soudeur, le procédé GTAW produit généralement un plus beau fini de soudure que la procédé GMAW.

* **la qualité de soudage**

 Le procédé GMAW est généralement plus économique pour les productions à grand volume.

* **les distorsions**

 Comme il a été mentionné plus haut, le procédé GMAW produit moins de distorsions puisqu’il est plus rapide et qu’il génère moins de chaleur dans les pièces.

* **la mécanisation**

 La mécanisation est synonyme de rapidité et la rapidité du soudage engendre moins de distorsion dans les pièces. Il faut toujours chercher à mécaniser les procédés lorsque cela est techniquement et économiquement justifié. Les deux procédés peuvent être utilisés en mode automatique, et seul le procédé GMAW peut être robotisé.

* **les prototypes de soudures**

Il est de bonne pratique de préparer des prototypes avant la production pour guider ses choix. C’est le moyen le plus sûr d’éviter les erreurs coûteuses.

# Autres procédés de soudage

## Diapositive 65 :

Pour les applications industrielles en mécanique et parfois en construction, il existe un grand nombre de techniques de soudage autres que celles qui ont été décrites à la section précédente. Quelques-unes sont d’utilisation générale (soudage par faisceau d’électrons, par faisceau laser, par résistance, à la molette ou le brasage, par exemple) et d’autres sont conçues pour des applications spécifiques (soudage par friction, par étincelage, par ultrasons ou par explosion). La plupart de ces procédés offrent l’avantage de pouvoir assembler les alliages qui ne sont pas soudables par les techniques classiques GTAW, GMAW et PAW.

Chacun de ces différents procédés de soudage est décrit très brièvement dans la présente section.

## Diapositive 67 et 68 :

**8.4.1 Soudage par friction**

Le soudage par friction est une technique de soudage par pression à chaud dans laquelle la montée en température est réalisés par frottement des pièces à assembler. On réalise de cette manière des soudures entre métaux différents, notamment des connecteurs cuivre-aluminium. Pour l’assemblage de pièce d’aluminium, un simple dégraissage est suffisant et une surface brute de découpage à la scie convient.

La méthode de soudage par friction-agitation (friction stir welding) est une méthode de soudage par friction relativement nouvelle, mais qui connaît un essor fulgurant.

La soudure est réalisée à l’aide d’une toupie qui tourne à haute vitesse et qui possède une base de forme précise et une tige profilée, tel qu’illustré sur la figure 8.20 (voir acétates 67 et 68). La tige profilée, aussi appelée sonde, est déplacée lentement le long de l’interface créée entre les deux pièces à souder, lesquelles sont maintenue en contact ferme. Une chaleur intense est produite par l’agitation et la friction créées dans le joint par l’outil, fait de matériau très résistant. Cette chaleur amollit le matériau des pièces à assembler sans que le point de fusion ne soit atteint. Le matériau plastifié est forgé par confinement sous la base de la toupie. La soudure est ainsi réalisée en phase solide.

C’est cette dernière caractéristique qui rend les procédés de soudage par friction très avantageux, en particulier le procédé étudié. Il est aussi possible de joindre des matériaux qui peuvent difficilement être soudés par fusion, comme les alliages des séries 2000 et 7000, par exemple.

## Diapositive 69 :

Les autres avantages sont :

* une faible distorsion, même pour les longues soudures, en raison de la faible chaleur générée par le procédé, comparativement au soudage par fusion;
* d’excellentes propriétés mécaniques, démontrées par des essais de traction, de flexion et de fatigue. Réalisé dans les règles de l’art, le chauffage local et rapide affecte beaucoup moins les propriétés mécaniques des alliages d’aluminium que les procédés de soudage par fusion. Des essais effectués sur des alliages 5083, 6082 et 7108 ont démontré une perte de résistance causée par le soudage qui peut varier entre zéro et moins de 20 % de la résistance du métal de base non soudé;
* l’absence de fumée;
* l’absence d’éclaboussure;
* un faible retrait;
* la possibilité de souder dans toutes les positions puisque le matériau demeure plastique lors du soudage;
* une efficacité énergétique;
* aucun matériau d’apport n’est requis;
* aucun gaz protecteur n’est requis;
* aucune certification n’est exigée pour le soudeur;
* un outil non consommable, quoiqu’il subisse une certaine dégradation. Par exemple, une tige profilée permet la réalisation de 1000 mètres de soudure sur un alliage de la série 6000;
* les surfaces à souder peuvent tolérer quelques imperfections;
* les faibles couches d’oxyde peuvent être laissées en place. La zone à souder n’a donc pas besoin d’être nettoyée par brossage, meulage ou à l’aide d’acides.

## Diapositive 70 :

Bien que le procédé soit encore en développement pour des applications particulières, la technologie est déjà au point et se prête bien à l’automation dans de multiples applications industrielles. Plus de 45 organisations internationales possèdent des licences d’exploitation non exclusives et plus de 225 brevets ont été déposés à ce jour.

Les limites du procédé de soudage par friction-agitation sont continuellement repoussées par les efforts intensifs de recherche et de développement réalisés depuis l’introduction de la méthode, en 1991. Les principales limites actuellement reconnues sont :

* une vitesse de soudure modérément plus lente que celle des procédés de soudage par fusion (jusqu’à 750 mm/minute pour le soudage de pièces de 5 mm d’épaisseur en alliage de la série 6000, sur une machine de type courant);
* les pièces à souder doivent être fermement tenues en place;
* un support envers est requis;
* une cavité se forme à l’extrémité de chaque cordon de soudure.

## Diapositive 71 :

Le procédé de soudure par friction-agitation permet :

* le soudage des alliages des séries 200, 5000, 6000, 7000 et 8000;
* le soudage entre pratiquement n’importe quelle combinaison d’alliages de corroyage (laminés, extrudés, forgés) et d’alliage de fonderie;
* le soudage du cuivre et de ses alliages, du plomb, du titane, du magnésium, du zinc, du plastique et même de l’acier doux;
* le soudage d’alliages d’aluminium à d’autres matériaux.

Les alliages d’aluminium peuvent être soudés en une seule passe sur des épaisseurs variant entre 1,2 et 50 mm, sans préparation du joint, et sur des épaisseurs pouvant excéder 75 mm, en procédant à deux passes, soit une de chaque côté du joint.

Le procédé a été utilisé pour la réalisation de joints bout à bout, de joints de recouvrement, de joints en T, de joints en coin et de soudure d’angle. Il existe des outils spécialisés pour chaque application. Enfin, il est possible de réaliser des joints autant circonférentiels que longitudinaux.

## Diapositive 73 :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage_par_faisceau_d%27%C3%A9lectrons>

Le soudage par faisceau d'électrons est un procédé de soudage utilisant l'interaction d'un faisceau d'électrons avec les pièces à assembler. Les électrons lancés à forte vitesse dans le vide possèdent une énergie cinétique importante qui sera transférée en grande partie à la pièce au moment de l'impact, générant ainsi suffisamment de chaleur pour provoquer la fonte puis le soudage des matériaux. Ce procédé de soudage est essentiellement automatisé, compte tenu de l'environnement nécessaire à la génération du faisceau d'électrons.

**8.4.2 Soudage par faisceau d’électrons**

Avec le soudage par faisceau laser, le soudage par faisceau d’électrons tombe dans la catégorie des procédés à haute densité d’énergie. Dans les deux cas, l’énergie du faisceau est concentrée dans un très faible volume, ce qui permet soit de réaliser des joints étroits avec une vitesse de soudage élevée, soit de souder des matériaux très épais en une seule passe.

La quantité de chaleur apportée par unité de longueur de cordon est 10 à 20 fois plus faible que lors du soudage à l’arc. Il en résulte :

* que les contraintes thermique et les déformations sont beaucoup plus faibles dans les pièces soudées. Cette propriété est très intéressante pour l’assemblage de pièces de grandes dimensions;
* une diminution de largeur de la zone affectée thermiquement.

Avec ces procédés, il est possible de souder des alliages contenant du cuivre des familles 2000 et 7000 parce qu’il n’y a pas de phénomène de fusion des joints de grains (liquation ou brûlure).

Dans la plupart des cas, le soudage est effectué sans métal d’apport. Il convient donc de :

* réduire au minimum l’espace entre les bords à souder,
* positionner les pièces avec précision par rapport au faisceau.

L’utilisation de fil d’apport est une technique délicate, mais elle permet d’élargir les tolérances du positionnement. De plus, dans le cas des alliages sujets à la fissuration, le métal d’apport limite les fissures dans le cordon.

Il est possible de réaliser des joints bout à bout, sur bords francs ou par recouvrement. Dans certains cas, la soudure d’angle est également possible. Pour le soudage par faisceau d’électrons, la conception des joints est très différente de celle du soudage à l’arc et elle relève de la compétence de spécialistes.

Dans le procédé de soudage par faisceau d’électrons, la fusion du joint est réalisée par bombardement d’électrons. Pour maîtriser la trajectoire des électrons, il est nécessaire d’opérer sous vide primaire, dans une enceinte close. Des machines à vide local permettent une utilisation plus souple du procédé, en cassant progressivement le vide dans des enceintes situées au-dessus du cordon de soudure. Ce procédé, dont la mise en œuvre est complexe, reste limité à des entreprises spécialisées, notamment à cause de l’émission de rayons X provoqués par la décélération des électrons.

Ce procédé peut être utilisé pour réaliser le soudage de petites pièces dans la production en grande série, comme c’est le cas pour l’acier. L’aluminium n’étant pas un matériau magnétique, les pièces à souder ne dévient pas le faisceau, contrairement à ce qui est observé avec d’autres métaux. Tous les alliages d’aluminium sont, a priori, soudables sans métal d’apport.

On peut souder par faisceau d’électrons, une gamme d’épaisseurs très étendue, allant de quelques dixièmes à plusieurs centaines de millimètres.

## Diapositive 74 :

<http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/139-le-soudage-par-faisceau-delectron.html>

**Soudage par faisceau d'électron, CODE ISO : 76**

ÉLECTRON BEAM WELDING

Ce procédé met en œuvre l’énergie d’un faisceau d’électrons accéléré. La fusion du métal est obtenue par le transfert de l’énergie cinétique en chaleur lorsque les électrons impactent les pièces.

Généralement, les pièces à souder et le canon à électrons sont placés dans la même enceinte où règne un vide de 10-6 Torr.

Le procédé nécessite une automatisation complète du fait que tout est dans une chambre à vide, le soudage par faisceau d'électrons permet l'assemblage de tôles d'acier de quelques 1/10 à 300 millimètres d'épaisseur, en une seule passe. La puissance du faisceau provoque la fusion presque instantanément sur toute l'épaisseur.

Ce procédé est le plus pénétrant des procédés de soudure, avec une géométrie fine et bords presque parallèle. La pénétration du faisceau permet de réaliser des soudures étroites, la préparation des bords doit être réalisée par usinage de précision.

La rapidité d'exécution et le faible apport d’énergie limite considérablement les zones thermiquement affectées.

## Diapositive 76 :

**8.4.3 Soudage par faisceau laser**

Le champ d’utilisation du soudage par faisceau laser a récemment connu de l’extension, avec l’arrivée sur le marché de nouvelles sources de soudage plus puissante et moins chères. Contrairement au soudage par faisceau d’électrons, le soudage au laser peut s’effectuer à l’air libre, sans gaz protecteur.

Les meilleures performances sont obtenues avec les lasers CO2 de puissance. Les vitesses de soudage sont de l’ordre de 5 à 10 m/min pour des épaisseurs inférieures à 3 mm et de 1 à 3 m/min pour des épaisseurs voisines de 6 mm.

Dans l’état actuel de la technique, les lasers YAG sont moins puissants que les lasers CO2, mais ils présentent un meilleur couplage avec les alliages d’aluminium. Leur longueur d’onde permet le transfert du faisceau par fibre optique, ce qui rend leur utilisation plus souple.

La bonne conductivité thermique de l'aluminium et son pouvoir réfléchissant élevé exigent l’utilisation de puissances de soudage relativement fortes pour obtenir la fusion. L’expérience a montré que les alliages contenant plus de 2 à 3 % de magnésium nécessitent une puissance moindre du fait d’un meilleur transfert énergétique par le plasma situé au-dessus du bain de fusion.

La plupart des alliages d’aluminium sont soudable à l’aide du procédé par faisceau laser.

## Diapositive 79 :

**8.4.4 Soudage par résistance**

Le soudage par résistance est un mode d’assemblage dans lequel la liaison de deux ou plusieurs éléments en aluminium est faite par **fusion localisée**. Elle est provoquée par l’échauffement qui résulte du passage d’un courant intense dans la résistance formée par le contact local des éléments en présence.

Le courant, en traversant les couches d’interface résistantes, provoque la fusion d’une lentille de métal (noyau). Les électrodes laissent une empreinte sur la surface, dont la profondeur dépend de la dureté du métal, des paramètres de soudage et de la forme de la face active de l’électrode.

Les conductivités thermique et électrique des alliages d’aluminium étant quatre fois plus élevées que celles de l'acier, il est important d’appliquer un fort courant de soudage (15 000 et 30 000 A) pendant un temps très court pour éviter la surchauffe. En conséquence, les installations de soudage par résistance des alliages d’aluminium ont des puissances électriques plus élevées que celles du soudage de l’acier, toute choses étant égales, par ailleurs.

La couche d’oxyde à la surface du métal n’empêche pas le soudage à la condition de régler les paramètres du soudage pour réduire la résistance de contact, notamment en augmentant l’effort de serrage, en choisissant des électrodes de forte dureté et en optimisant la forme de la face active des électrodes.

Le soudage par résistance est une des techniques utilisées pour souder les goujons, comme on l’a vu à la sous-section 8.2.5.

## Diapositive 81 :

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/assemblage-des-materiaux-par-soudage-42512210/soudage-par-resistance-b7720/soudage-a-la-molette-b7720niv10003.html>

Le soudage à la molette diffère du soudage par points en ce que les électrodes classiques sont ici remplacées par des disques en cuivre, ou *molettes*, qui par rotation permettent de faire des soudures par recouvrement, continues et étanches.

La soudure se réalise de façon progressive et continue, associant serrage des tôles et passage du courant, sur toute la longueur du cordon à réaliser.

Un cycle de soudage comporte donc les phases suivantes, similaires à celles du soudage par points :

* l’accostage : les deux molettes viennent serrer, pour les accoster et localiser le courant, les deux pièces à souder au point de départ ;
* le soudage : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur primaire, et la rotation des molettes est engagée, créant une liaison continue ;
* l’arrêt qui commande l’écartement des molettes en fin de cordon.

Le cycle de soudage est celui de la figure [10](https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/assemblage-des-materiaux-par-soudage-42512210/soudage-par-resistance-b7720/soudage-a-la-molette-b7720niv10003.html) où l’on a également représenté une machine typique et les différentes phases opératoires.

**8.4.5 Soudage à la molette**

Le soudage à la molette est un procédé dérivé du soudage électrique par points (soudage par résistance). Les électrodes sont remplacées par deux disques ou molettes qui entraînent les pièces par friction. Le courant est lancé à intervalles plus ou moins longs de façon à réaliser des séries de points qui peuvent être séparés, joints ou imbriqués. Ce type de soudage se prête bien à la fermeture étanche de réservoirs à parois minces.

## Diapositive 83 :

<http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/140-soudage-par-etincelage.html>

**Flash welding:**

Les pièces à assembler sont bridées entre des mors reliés à une source de courant. Les surfaces en contact doivent être préparées, l'échauffement par effet Joule à lieu uniformément sur toute la section.

 Lorsque la température atteinte est suffisante, le soudage est obtenu par refoulement des deux surfaces par forgeage après arrêt du courant ; il se produit un bourrelet autour du joint. Afin d'assurer une bonne continuité du joint, une opération d’usinage est nécessaire pour éliminer renflement et trace d'oxyde ou de souillure.

L'expulsion des vapeurs métalliques fournit une atmosphère qui met le joint à l'abri d'une contamination par l'air.

Le soudage par étincelage s'applique non seulement à l'assemblage en bout de barres, tubes ou autres produits longs, mais aussi à la réalisation de la soudure longitudinale des tubes.

**8.4.6 Soudage par étincelage**

Le soudage par étincelage peut être réalisé en bout à bout sur des pièces serrées dans des mors qui servent d’amenée du courant. Les pièces peuvent être serrées, puis mises sous tension. C’est aussi du soudage par résistance.

Les pièces peuvent également être mises simultanément en contact et sous tension. Dans ce cas, il y a formation de petits cratères de fusion qui s’étendent rapidement sur toute la surface de contact. Ce procédé peut être adapté en continu pour la fabrication de profilés ou de tubes roulés soudés.

Le soudage des goujons par décharge de condensateur est, en fait, un cas particulier du soudage par étincelage (sous-section 8.2.5[[27]](#footnote-27)).

## Diapositive 85 :

<https://www.alpha.be/fr/technologie/21117/soudage-par-ultrasons-de-metaux>

**Soudage par ultrasons de métaux**

**Qu’est-ce que le soudage métallique par ultrasons ?**

Le soudage métallique par ultrasons est une sorte de soudage par friction lors duquel l’oxyde et d'autres salissures sont brisés sur la surface. Les pièces à souder sont assemblées sous une pression uniforme. Une liaison moléculaire apparaît, elle est précise, très résistante et extrêmement fiable.

**Assemblages possibles**

Soudage longitudinal

Soudure torsionnelle - Soniqtwist

Soudure torsionnelle – PowerWheel

**Atouts du soudage de métaux par ultrasons**

* processus rapide, propre et économique
* assemblage précis, fiable et de qualité supérieure
* soudage de cuivre, d'aluminium, de nickel, d'alliage et d'autres matériaux
* échauffement moindre des pièces à souder - la température de fusion n’est pas atteinte
* les matériaux à côté de la zone de soudage (isolation des câbles) ne sont pas endommagés
* conduction électrique parfaite et permanente des pièces assemblées (p.ex. câbles électriques)
* des dimensions et géométries inhabituelles peuvent être soudées
* les paramètres de soudage pertinents pour le contrôle de qualité sont visibles grâce au logiciel complet

**Soudabilité**

* métaux non ferreux : cuivre, aluminium, argent, etc.
* alliages métalliques non ferreux

**8.4.7 Soudage par ultrasons**

Dans le procédé de soudage par ultrasons, l’énergie haute fréquence est convertie en énergie vibratoire qui, en produisant des frottements à l’interface des deux surfaces, provoque le soudage.

Avec ce procédé, les alliages d’aluminium sont soudables entre eux, mais aussi avec d’autres matériaux dont le verre et les céramiques. Le rapport des épaisseurs à souder doit rester inférieur à 4 pour une tenue mécanique correcte. Les puissances mises en jeu sont infimes par rapport au soudage par point (de 100 à 4 000 W). Il n’est pas nécessaire d’avoir une préparation de surface spéciale.

## Diapositive 87 :

**8.4.8 Soudage par explosion**

Dans le soudage par explosion, on utilise l’énergie provoquée par la détonation d’un explosif pour lier deux éléments entre eux. La force produite par la détonation de l’explosif crée une soudure à haute résistance avec un minimum de diffusion et de déformation à l’interface des pièces. Cette technique est limitée aux joints à recouvrement et à la liaison de panneaux d’aluminium à d’autres types de métaux, comme les aciers (inoxydables ou non), le cuivre ou le titane. Les plaques bi-métalliques ainsi formées sont découpées en segments de transition. Des techniques conventionnelles de soudage sont ensuite utilisées pour souder, par exemple, l’aluminium et l’acier de chaque côté du segment.

Pour le soudage par explosion, la préparation des surfaces est semblable à celle des autres procédés de soudage. Le nettoyage doit être effectué peu de temps avant le soudage et la couche d’oxyde, laissée en place, est brisée et dispersée lors du soudage.

## Diapositive 89 :

**8.4.9 Le brassage**

Le brassage consiste à lier des pièces métalliques à l’aide d’un métal d’apport à l’état liquide. Ce métal (ou alliage) a une température de fusion inférieure à celle des métaux de base à assembler. Il vient mouiller les surfaces à assembler pour former le joint brasé. Des exemples typiques de joints réalisés avec le soudage par brasage sont illustrés sur la figure 8.21 (voir acétate 90). Deux procédés existent : le brasage fort, si la température de brasage est supérieure à 450°C, et le brasage tendre, si elle est inférieure à 450°C.

Dans le procédé de brasage fort, il est essentiel d’éliminer la couche d’oxyde présente à la surface et d’éviter l’oxydation au cours du chauffage, pour obtenir des joints de bonne qualité et pour maîtriser le phénomène de capillarité.

Les techniques de brasage fort sont le brasage à l’air, avec flux à résidus corrosifs ou non corrosifs, le brasage sous atmosphère contrôlée neutre, avec ou sans flux, et le brasage sous vide, sans flux.

Les alliages d’apport dépendent du procédé utilisé. Ainsi, pour les procédés avec flux corrosifs ou non, on utilise les alliages 4343, 4045 et 4047. Pour le brasage sous vide, on utilise les alliages 4004 et 4104. Les alliages qui peuvent être brasés doivent avoir une température de fusion supérieure à 620°C. C’est le cas des alliages 1050, 1100, 1200, 3003, 3005, 3105, 6060 et 6063.

La température habituelle de brasage de ces alliages est voisine de 600°C et la durée de maintien est de quelques minutes. Pour obtenir des joints étanches, il faut réduire la diffusion dans la zone brasée et la dissolution excessive du métal de base par le métal d’apport à l’état liquide.

Les caractéristiques mécaniques des matériaux soumis au cycle de brasage correspondent à celle d’un état recuit (état O), pour les alliages non traitables thermiquement ou d’un état T4 pour les alliages traités thermiquement (série 6000), à condition que le refroidissement soit rapide après le brasage (de 1 à 3°C/s).

Le brasage fort est la technique qui est largement utilisée dans la fabrication des échangeurs thermiques dans l’automobile où l’étanchéité est primordiale. Il a d’autres applications comme les échangeurs pour l’aéronautique, les guides d’ondes, etc. Les applications structurales sont limitées.

Le brasage tendre est possible pour la plupart des alliages d’aluminium à condition d’effectuer des préparations de surface appropriées au métal d’apport et à l’application envisagée. Les propriétés recherchées sont en général l’étanchéité et la conductivité thermique ou électrique. La résistance mécanique du joint est faible, ce qui a pour conséquence de rendre impossible le recours à ce procédé de soudage pour des applications structurales.

Les métaux d’apport à base de plomb, de cadmium, de zinc, etc., sont utilisables avec des flux appropriés qu’il faut éliminer après brasage. Le chauffage est souvent réalisé à la flamme et parfois au four.

**Figure 8.21 – Exemple de joints soudés par brasage pour les alliages d’aluminium**

En milieu humide, les résidus de flux sont un facteur de corrosion des alliages d’aluminium. D’autre part, les assemblages faits avec des brasures tendres à base d’étain, de plomb et de cadmium ne peuvent être exposés à un milieu humide sous peine de voir se développer une corrosion galvanique du support en alliage d’aluminium.

Le brasage tendre tend à disparaître, pour être remplacé par le collage (sous-section 7.12.5[[28]](#footnote-28)), pour des raisons de simplicité de mise en œuvre et de risque de corrosion galvanique, en milieu humide ou agressif, dans la zone proche ou au contact du joint. Les joints soudés par brasage de la figure 8.21 ressemblent à des joints soudés, mais ils s’apparentent davantage aux joints collés.

# Résistance des soudures à rainure

## Diapositive 93 :

**8.5 Résistance des soudures à rainure**

Il existe une grande variabilité dans la résistance des soudures et dans la largeur des zones affectées thermiquement, en raison de la multitude de paramètres évoqués précédemment. Les valeurs de résistance proposées dans les tableaux 2.8[[29]](#footnote-29) et 2.9[[30]](#footnote-30) sont des valeurs minimales qui tiennent compte de tous ces paramètres et les modèles d’évaluation des zones de capacité réduite après le soudage, présentés sur la figure 4.16, sont des modèles représentatifs mais sécuritaires qui tiennent aussi compte des nombreuses variables qui caractérisent le soudage.

La norme S157 permet toutefois d’utiliser des valeurs moins sécuritaires lorsqu’il peut être démontré de façon rigoureuse que de telles valeurs existent. Cette remarque est générale et s’applique non seulement au calcul des assemblages soudés, mais à l’ensemble des recommandations de la norme.

**8.5.1 Résistance en traction**

La résistance en traction d’une soudure à rainure est évaluée en considérant la plus petite valeur obtenue des équations (4.26[[31]](#footnote-31)), (4.30[[32]](#footnote-32)) et (4.31[[33]](#footnote-33)). L’équation (4.26) donne la résistance à la plastification de la section brute, en dehors du joint soudé et les équations (4.30) et (4.31) donnent la résistance en traction de la section en tenant compte de la présence de soudures transversales et longitudinales, respectivement.

Lorsque les soudures à rainure sont à pénétration complète, les épaisseurs nominales (gorges efficaces, tw) à considérer dans le calcul des aires de sections sont les épaisseurs des pièces soudées, tel que mentionné à la sous-section 8.2.4. Lorsque les soudures sont à pénétration partielle, une portion de la section n’est pas disponible et il faut en tenir compte dans les calculs en suivant les recommandations présentées à la sous-section 8.2.4.

Il convient de rappeler que la norme S157 ne recommande pas l’usage d’assemblages à rainure à pénétration partielle dans les charpentes en aluminium, mais qu’elle n’en interdit pas l’usage.

## Diapositive 95 :

**8.5.2 Résistance en compression**

La résistance pondérée en compression (Cr) d’une soudure à rainure transversale à pénétration complète est évaluée en considérant la plus petite des deux valeurs suivantes lorsque la portion de la pièce qui contient la soudure n’est pas libre de déverser ou de flamber :

$C\_{r}=ϕ\_{y} A F\_{y}$ (8.11)

$C\_{r}=ϕ\_{u} A F\_{wu}$ (8.12)

Dans ces équations, $ϕ\_{y}$ = 0,9, $ϕ\_{u}$ = 0,75, A est l’aire de la section, $F\_{y}$ est la limite élastique de l’alliage (tableau 2.8) et $F\_{wu}$ est la résistance ultime de la soudure (tableau 2.9). Lorsque la soudure à rainure est à pénétration partielle, l’aire (A) est remplacée par l’aire efficace (ou nette, An) de la section soudée, telle que définie par l’équation (8.8[[34]](#footnote-34)).

Lorsque le joint soudé est affecté par le flambement ou le déversement, il faut appliquer les recommandations décrites dans les chapitres V et VI pour le calcul des résistance (voir, en particulier, la sous-section 5.6.1 et l’équation 5.43[[35]](#footnote-35)).

## Diapositive 97 :

**8.5.3 Résistance en cisaillement**

Pour le calcul de la résistance en cisaillement des soudures à rainure, on applique de façon sécuritaire le critère de Von Mises, tant à la résistance ultime (Fwu) de la soudure qu’à la limite élastique du matériau de base (Fy), même s’il est prouvé que ce critère ne s’applique pas vraiment à l’ultime.

Ainsi, la résistance pondérée en cisaillement (Vr) d’une soudure à rainure à pénétration totale doit être égale à la plus petite des deux valeurs obtenues des équations suivantes où tous les termes ont été définis précédemment :

$V\_{r}=ϕ\_{y} 0,6 A F\_{y}$ (8.13)

$V\_{r}=ϕ\_{u} 0,6 A F\_{wu}$ (8.14)

Une fois de plus, il suffit de remplacer A par la valeur de An donnée par l’équation (8.8) lorsque la soudure à rainure est à pénétration partielle. Un exemple de calcul est présenté à la sous-section 8.10.1[[36]](#footnote-36).

# Résistance des soudures à bords tombés

## Diapositive 100 :

**8.5.4 Résistance des soudures à rainure à bords tombés**

Il est difficile de qualifier de façon précise la résistance d’une soudure réalisée pour relier entre elles des sections courbes ou une section courbe et une plaque, tel que dans les exemples de figures 8.4 (voir acétate 19) et 8.14 (voir acétate 100). La référence (8.6) recommande au concepteur ou à l’entrepreneur de démontrer que leur soudure se qualifie pour résister aux charges qui lui sont appliquées, c’est-à-dire de faire la preuve que la soudure possède une pénétration et une gorge effective (tw) adéquate.

Deux méthodes sont proposées : la mesure de l’épaisseur de la gorge effective et les essais de chargement.

Dans le premier cas, la gorge mesurée doit excéder de 3 mm la gorge requise pour résister aux charges. Les équations qui s’appliquent sont celles des sous-sections 8.5.1 à 8.5.3 pour la résistance, selon le type de sollicitation, l’équation (8.8) pour le calcul de l’aire de la section efficace et les équations (8.9[[37]](#footnote-37)) et (8.10[[38]](#footnote-38)) pour le calcul de la gorge efficace.

Dans le deuxième cas, il est recommandé de procéder à des essais destructifs sur trois spécimens fabriqués consécutivement, en utilisant la même procédure de fabrication et à retenir comme valeur caractéristique de résistance, la plus faible des valeurs obtenues.

## Diapositive 102 :

**8.5.5 Résistance des soudures de goujons**

Si un goujon en aluminium est soudé de façon adéquate à un élément en alliage d’aluminium, la pleine résistance du goujon est alors disponible et il peut être calculé comme un boulon ou un rivet, selon la théorie étudiée au chapitre VII[[39]](#footnote-39).

Pour que le goujon soit qualifié, la résistance pondérée des soudures en traction et cisaillement doit être égale aux valeurs données par les équations suivantes, dans lesquelles $Φ\_{f} = 0,67$ et Ab est l’aire de la tige du goujon ($A\_{b}={πd^{2}}/{4}$) :

$T\_{r}=ϕ\_{f} A\_{g} F\_{wu}$ (8.15)

$V\_{r}=ϕ\_{f} 0,6 A\_{b} F\_{wu}$ (8.16)

# Assemblages concentriques avec soudure d’angle

## Diapositive 105 :

**8.6 Assemblages concentriques avec soudure d’angle**

Pour les assemblages avec soudure d’angle, comme on l’a souligné à la sous-section 8.1.7, il faut distinguer les assemblages concentriques, les assemblages excentriques en torsion, et les assemblages excentriques en flexion, pour un moment qui agit soit dans le plan x – y, soit dans le plan y – z de l’assemblage (figure 8.7 – voir acétates 28 et 29).

Les équations de base pour le calcul des soudures d’angle seront d’abord étudiées en considérant l’application la plus simple, soit celle des assemblages concentriques. Les autres types d’assemblages seront étudiés dans les sections suivantes.

Quelle que soit l’orientation de la charge appliquée par rapport à l’axe d’un cordon de soudure d’angle, la soudure peut être considérée comme cisaillée. Pour la soudure d’angle, de nombreux essais et analyses ont montré que la résistance ultime en cisaillement et la ductilité de la rupture dépendent de l’orientation de la charge par rapport à l’axe du cordon, tant pour le soudage de l’aluminium que pour le soudage de l’acier. Cette orientation est définie par l’angle θ. Pour un cordon latéral, la charge est parallèle à l’axe du cordon et $θ=0°$. Pour un cordon frontal, elle est perpendiculaire et $θ=90°$ (figure 8.22a).

Sur les figures 8.22b et c, sont présentés des résultats d’essais caractéristiques des structures soudées en acier et en aluminium montrant l’influence de l’orientation de la charge. On remarque que les cordons latéraux sont les moins résistants mais les plus ductiles, la déformation à la rupture étant maximale pour ces cordons. On observe le phénomène contraire pour les cordons frontaux, soit une résistance maximale et une ductilité minimale.

**Figure 8.22 – Comportement des soudures d’angle (voir acétate)**

## Diapositive 106 :

Quelques analyses théoriques ont confirmé les observations expérimentales, à savoir que le plan de rupture de la soudure d’angle varie suivant l’orientation de la charge. Selon ces résultats, les chercheurs ont admis que, pour un cordon latéral, le plan de rupture de la soudure d’angle correspond à la section critique ou efficace définie sur la figure 8.10 (voir acétate 38) et que, pour un cordon frontal, le plan de rupture de la soudure d’angle correspond plus ou moins à une des surfaces de fusion définies sur la même figure, celle qui est parallèle à la charge. Ces hypothèses sont résumées sur les figures 8.23a et b.

Même si les chercheurs s’entendent sur l’hypothèse concernant le plan de rupture et la résistance des cordons latéraux, ils divergent d’opinion sur le reste, d’où l’absence d’un modèle unique pour le calcul de la résistance des soudures d’angle en fonction de l’orientation de la charge.

**Figure 8.23 – Variation du plan de rupture (voir acétate)**

## Diapositive 107 :

Quelle que soit l’hypothèse retenue (figure 8.2b et c), ce qui importe est d’adopter pour les calculs une méthode qui simule de façon adéquate les nombreux résultats d’essais expérimentaux obtenus sur les soudures d’angle. En ce sens, la norme S157 propose une méthode de calcul basée sur une relation de type sphérique entre les différentes résistances, et recommande de considérer une contrainte de cisaillement pur égale à $0.6F\_{wu}$, selon l’axe du cordon de soudure (axe x sur la figure 8.23a).

La résistance pondérée par unité de longueur (vr), d’un cordon de soudure sollicité de façon concentrique est donné par l’équation suivante :

$v\_{r}=ϕ\_{f} k t\_{w} F\_{wu}$ (8.17)

Dans cette équation, $ϕ\_{f}$ est égal à 0,67, $t\_{w}$ est donné par l’une ou l’autre des équations (8.1) à (8.3), l’équation (8.1) étant la plus courante, et k est un coefficient relié à l’orientation de la charge appliquée et défini sur la figure 8.24.

**Figure 8.2 – Joints en T et en coin avec soudures à rainure et soudures d’angles (voir acétates 15 et 16)**

**Figure 8.23 – Variation du plan de rupture (voir acétate 106)**

**Figure 8.24 – sollicitation d’un cordon de soudure d’angle et définition du coefficient k (voir acétate 107)**

## Diapositive 108 :

On constate que trois valeurs simples ont été retenues pour le coefficient k, reflétant la plus ou moins grande rigidité offerte par les soudures d'angle en fonction de l’orientation de la charge. Il est intéressant de comparer ces résultats aux valeurs correspondantes recommandées par d’autres normes, afin d’illustrer la divergence des modèles. Les résultats sont compilés dans le tableau 8.3 (voir acétate).

## Diapositive 109 :

Lorsqu’une force (P) sollicite un cordon de soudure selon un angle quelconque, elle peut être décomposée, selon chacun des axes x, y et z, en efforts de cisaillement (v) par unité de longueur, tel qu’illustré sur la figure 8.24a (voir acétate 107). Lorsqu’on combine ces efforts, on a le choix des modèles. La référence (8.6) a retenu la formule d’interaction de forme sphérique suivante, qui simule très bien le comportement observé expérimentalement :

$$\left(\frac{v\_{x}}{v\_{rx}}\right)^{2}+\left(\frac{v\_{y}}{v\_{ry}}\right)^{2}+\left(\frac{v\_{z}}{v\_{rz}}\right)^{2}\leq 1.0$$

Lorsqu’on introduit l’équation (8.17) dans cette équation, on obtient l’équation suivante :

$\left(\frac{v\_{x}}{0,6}\right)^{2}+\left(\frac{v\_{y}}{0,7}\right)^{2}+\left(\frac{v\_{z}}{0,8}\right)^{2}\leq \left(ϕ\_{f} t\_{w} F\_{wu}\right)^{2}$ (8.18)

Lorsque l’effort n’agit que dans un plan (x – y ou x – z) et qu’on hésite sur le choix de la valeur du coefficient k à retenir pour les calculs, on choisit de façon sécuritaire la valeur la moins élevée, soit $k = 0.7$ pour l’effort agissant selon l’axe y ou z, et $k = 0.6$ pour l’effort agissant selon l’axe x.

D’autres normes (la référence (8.7), par exemple) considèrent les efforts par unité de longueur calculés sur la section efficace, définie sur la figure 8.10 (voir acétate 38), et les combinent en appliquant le critère de plasticité de Von Mises (figure 8.25 – voir acétate), même s’il a été démontré qu’il ne peut être convenablement appliqué à la résistance ultime (Fwu), tel que mentionné précédemment.

Il est généralement plus pratique, pour les calculs, de considérer la résistance au cisaillement de la soudure d’angle par unité de longueur et par unité de grosseur nominale du cordon (N/mm/mm). Cette résistance, dénotée $q\_{r}$, est aussi appelée flux de cisaillement résistant par millimètre de grosseur nominale.

## Diapositive 110 :

Il est généralement plus pratique, pour les calculs, de considérer la résistance au cisaillement de la soudure d’angle par unité de longueur et par unité de grosseur nominale du cordon (N/mm/mm). Cette résistance, dénotée $q\_{r}$, est aussi appelée flux de cisaillement résistant par millimètre de grosseur nominale.

Si on introduit l’équation (8.1) dans l’équation (8.17), on obtient :

$v\_{r}=ϕ\_{f} k 0.707 D F\_{wu}$ (8.19)

$v\_{r}=D q\_{r}$ (8.20)

$q\_{r}=ϕ\_{f} 0.707 k F\_{wu}$ (8.21)

## Diapositive 111 :

Avant de commencer les calculs d’un assemblage soudé, on connaît généralement les efforts à transférer, le type de soudure et les propriétés mécaniques de la soudure. Si l’assemblage est réalisé avec de la soudure d’angle, il faut établir si l’assemblage est concentrique ou excentrique, selon la classification définie à la sous-section 8.1.7. Dans la mesure du possible, la soudure d’angle est disposée de manière à transmettre les forces sans excentricité. Toutefois, comme pour le soudage des cornières, cela n’est pas toujours possible.

Si l’assemblage est soumis à un chargement statique et si l’excentricité est mineure, on peut négliger les effets de l’excentricité et considérer qu’il s’agit d’un assemblage concentrique. Si on doit considérer la possibilité d’une rupture par fatigue due à des charges cycliques fréquentes, il faut éliminer l’excentricité ou en tenir compte dans les calculs, comme on le verra à la section suivante.

Le calcul de la soudure d’angle consiste à déterminer la grosseur nominale du cordon (D) et la longueur totale de la soudure, dénotée Lt. Pour les assemblages concentriques, on ne dispose que d’une seule équation pour ces deux inconnues. Toutefois, compte tenu de l’espace disponible dans l’assemblage et des dimensions des pièces de transfert (longueur et largeur), la longueur totale des cordons de soudure est souvent connue. Si c’est le cas, il suffit de déterminer la grosseur du cordon. Si on ne connaît pas la longueur de la soudure, on peut choisir arbitrairement la grosseur des cordons, en tenant compte de l’épaisseur des pièces à joindre, calculer la longueur de soudure requise et déterminer l’arrangement géométrique des cordons.

La résistance pondéré d’un assemblage concentrique est égale à la somme des résistances pondérés de chaque cordon. On dénote par Pf l’effort pondéré sollicitant l’assemblage, par Pr la résistance pondérée de l’assemblage, par Li la longueur d’un cordon quelconque, par *n* le nombre de cordon et par Lr la longueur totale de la soudure :

$L\_{t}=\sum\_{i=1}^{n}L\_{i}$ (8.22)

Comme tous les cordons ont généralement la même grosseur nominale (D), il suffit de vérifier l’équation suivante dans laquelle $q\_{ri}$ est donné par l’équation (8.21) :

$P\_{r}=D\sum\_{i=1}^{n}q\_{ri}L\_{i}\geq P\_{f}$ (8.23)

$D\geq \frac{P\_{f}}{\sum\_{i=1}^{n}q\_{ri} L\_{i}}$ (8.24)

Il faut noter que la longueur d’un cordon de soudure d’angle est généralement mesurée à la racine du cordon. Il existe toutefois des exceptions. Comme on l’a vu à la sous-section 8.1.3, la longueur des soudures en bouchon et en entaille (ce sont des soudures d’angle) est mesurée le long de la ligne médiane du cordon et, comme on le verra dans la prochaine section, la longueur des soudures d’angle dans les assemblages excentriques en torsion est aussi mesurée sur la ligne médiane du cordon. Un exemple de calcul est présenté à la sous-section 8.10.2.

# Assemblages soudés excentriques en torsion

## Diapositive 114 :

**8.7 Assemblages soudés excentriques en torsion**

Un assemblage soudé est excentrique en torsion si la charge agit dans un plan parallèle à la surface de contact des pièces soudées et si elle est excentrée par rapport au centre de gravité de la soudure (figures 8.7b (voir acétate 28) et 8.26). En général, dans ce type d’assemblage, les pièces soudées ne butent pas l’une contre l’autre, de sorte que le couple de torsion est repris entièrement par la soudure.

On note, sur la figure 8.26, que les cordons de soudure d’angle peuvent avoir un arrangement géométrique fermé ou un arrangement ouvert, selon que l’on soude ou non sur l’épaisseur de l’aile du poteau.

Pour le calcul de la résistance pondérée de ce type d’assemblage, on peut utiliser, comme dans les assemblages avec connecteurs mécaniques, une approximation de l’analyse à l’état limite ultime, une analyse élastique classique, une analyse élastique adaptée (appelée simplement analyse élastique) et une analyse à l’état limite ultime.

**8.7.1 Approximation de l’analyse à l’état limite ultime**

L’excentricité a toujours pour effet de réduire la capacité de l’assemblage, lorsque celle-ci est comparée à celle d’un assemblage concentrique ayant les mêmes propriétés géométriques. Cette réduction est d’autant plus grande que l’excentricité est importante, comparée aux dimensions de l’arrangement des cordons de soudure. Cette importance est mesurée par le rapport ${e}/{r\_{m}}$ où e est l’excentricité de la charge, et $r\_{m}$, la distance entre le centre de gravité des cordons et le point de la soudure le plus éloigné du centre de gravité (figure 8.26).

**Figure 8.26 – Assemblage soudé excentrique en torsion (voir acétate 114)**

On a tracé, sur la figure 8.27, une courbe donnant le pourcentage de réduction de la capacité (pr) en fonction du rapport ${e}/{r\_{m}}$. Cette courbe a été obtenue à partir d’analyses à l’état limite ultime de configurations simples de soudure comme celles qui sont montrées sur la figure 8.26, pour diverses valeurs des rapports $e/L\_{1}$ et $L\_{2}/L\_{1}$. Il s’agit d’une courbe moyenne, mais tout à fait suffisante pour le dimensionnement.

Une comparaison des courbes des figures 7.17[[40]](#footnote-40) et 8.27 montre que l’excentricité cause une réduction plus rapide de capacité pour les assemblages boulonnés. À cause de la continuité des cordons, la soudure est plus efficace.

**Figure 8.27 – Pourcentage de réduction de la capacité d’un assemblage excentrique en torsion (voir acétate 115)**

Pour un assemblage soudé excentrique en torsion, l’équation (8.23) peut s’écrire :

$P\_{r}=\left(\frac{100 - p\_{r}}{100}\right)D\sum\_{i=1}^{n}q\_{ri} L\_{i}\geq P\_{f}$ (8.25)

Il est important de souligner que le pourcentage de réduction donné par la courbe de la figure 8.27 est relatif à un assemblage concentrique et que les valeurs de pr qui ont servi à tracer cette courbe ont été calculées à partir des valeurs données dans les tableaux de la référence (8.33) pour des assemblages soudés simples, excentriques en torsion. Or, dans cette référence, l’effet de l'angle θ a été négligé pour les assemblages concentriques, de sorte que toutes les valeurs de qri de l’équation (8.25) ont été calculées avec une valeur de k constante et égale à 0,6. Autrement dit, il faut utiliser l’équation (8.26) au lieu de (8.25), avec k = 0,6 pour le calcul de qr, si on se sert de la courbe de la figure 8.27 pour déterminer la valeur de pr.

$D\geq \left(\frac{100}{100 - p\_{r}}\right)\frac{P\_{f}}{q\_{r} L\_{t}}$ (8.26)

Puisque k est constant et égal à 0,6 dans l’équation (8.26), qr n’est plus une variable et la sommation ne s’applique qu’à Li; ce qui résulte en Lt, d’après l’équation (8.22).

Pour utiliser cette dernière équation, il suffit de calculer rm et le rapport ${e}/{r\_{m}}$, et de déterminer la valeur de pr sur la courbe de la figure 8.27. La valeur de D ainsi obtenue est une bonne approximation de la valeur obtenue par une analyse plus précise à l’état limite ultime (sous-section 8.7.4), mais à la suite de calculs beaucoup plus simples. Il conviendrait toutefois d’adapter davantage cette méthode aux assemblages de charpentes d’aluminium.

# Assemblages soudés excentriques en flexion

(Voir PowerPoint)

# Assemblages pour le transfert d’un effort tranchant

## Diapositive 135 :

Le calcul d’un assemblage à cornières jumelées (ou avec un profilé en T comme pièce de transfert) est basé sur les deux hypothèses suivantes, illustrée sur la figure 8.33 (voir acétate) :

* aucun moment n’est transféré au poteau, de sorte que l’on ne trouve qu’un effort tranchant à la face du poteau;
* les excentricités sont considérées dans le calcul de la soudure, mais elles sont négligées dans le calcul des connecteurs mécaniques (généralement des boulons).

Ces hypothèses ne sont acceptables que si l’excentricité ne dépasse pas les valeurs que l’on observe habituellement dans ce type d’assemblages, soit 50 à 70 mm pour les connecteurs mécaniques et 60 à 100 mm pour les soudures. Dans le cas contraire, il faut considérer les excentricités dans le calcul des deux types de connecteurs, boulons et soudure.

# Exemples pratiques

(Voir PowerPoint)

1. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 499 [↑](#footnote-ref-1)
2. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 52 [↑](#footnote-ref-2)
3. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 54 [↑](#footnote-ref-3)
4. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 68 [↑](#footnote-ref-4)
5. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 75 [↑](#footnote-ref-5)
6. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 76 [↑](#footnote-ref-6)
7. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, Denis Beaulieu, 2ième édition, p 18 [↑](#footnote-ref-7)
8. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Les caractéristiques de l’aluminium structural*, Denis Beaulieu, 2ième édition, p 23 [↑](#footnote-ref-8)
9. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 616 [↑](#footnote-ref-9)
10. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 642 [↑](#footnote-ref-10)
11. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 645 [↑](#footnote-ref-11)
12. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 629 [↑](#footnote-ref-12)
13. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 634 [↑](#footnote-ref-13)
14. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, Section 2.13, pp 91-108 [↑](#footnote-ref-14)
15. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 94 [↑](#footnote-ref-15)
16. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 65 [↑](#footnote-ref-16)
17. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 133 [↑](#footnote-ref-17)
18. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 622 [↑](#footnote-ref-18)
19. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 100 [↑](#footnote-ref-19)
20. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 645 [↑](#footnote-ref-20)
21. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, Section 8.10, pp 668-684 [↑](#footnote-ref-21)
22. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 76 [↑](#footnote-ref-22)
23. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, Références, pp 686-688 [↑](#footnote-ref-23)
24. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 642 [↑](#footnote-ref-24)
25. <https://tpe-physique-cuisine.pagesperso-orange.fr/fiche-gaz-inerte.html> [↑](#footnote-ref-25)
26. <https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9tal_r%C3%A9fractaire#:~:text=Les%20m%C3%A9taux%20r%C3%A9fractaires%20sont%20une,%C3%A0%20ce%20groupe%20peut%20varier>. [↑](#footnote-ref-26)
27. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, Section 8.2, pp 616-625 [↑](#footnote-ref-27)
28. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 570 [↑](#footnote-ref-28)
29. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 75 [↑](#footnote-ref-29)
30. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 76 [↑](#footnote-ref-30)
31. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 261 [↑](#footnote-ref-31)
32. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 261 [↑](#footnote-ref-32)
33. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 262 [↑](#footnote-ref-33)
34. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 626 [↑](#footnote-ref-34)
35. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 324 [↑](#footnote-ref-35)
36. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 668 [↑](#footnote-ref-36)
37. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 626 [↑](#footnote-ref-37)
38. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 626 [↑](#footnote-ref-38)
39. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, pp 499-602 [↑](#footnote-ref-39)
40. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 540 [↑](#footnote-ref-40)