

ESDEP

GROUPE DE TRAVAIL 11

ASSEMBLAGES SOUS CHARGEMENT STATIQUE

Leçon 11.2.1

**Généralités sur les assemblages
soudés**



OBJECTIF

Décrire les différents types de soudures utilisées dans les structures et fournir l'information de base sur la préparation et la qualité des soudures.

PREREQUIS

| | |
|---|---|
| Leçons 1B.5.1 & 1B.5.2 : | Introduction aux bâtiments industriels |
| Leçon 2.1 : | Caractéristiques des alliages fer - carbone |
| Leçons 2.3.1 & 2.3.2 : | Propriétés des aciers |
| Leçons 3.2.1, 3.2.2 & 3.2.3 : | Montage |
| Leçon 3.5 : | Fabrication et montage des bâtiments |
| Leçon 3.6 : | Inspection – Assurance qualité |
| Leçon 11.1.2 : | Introduction au dimensionnement des assemblages |

LEÇONS CONNEXES

| | |
|--|---|
| Leçon 2.4 : | Nuances et qualités des aciers |
| Leçon 2.6 : | La soudabilité des aciers de construction |
| Leçon 3.3 : | Principes du soudage |
| Leçon 3.4 : | Modes opératoires de soudage |
| Leçons 11.2.2 & 11.2.3 : | Autres leçons sur les assemblages soudés |
| Leçons 11.4 : | Analyse des assemblages |

RESUME

Les caractéristiques mécaniques et géométriques des soudures sont décrites. Les principes fondamentaux relatifs à la préparation des bords, l'ajustage et la qualité des soudures sont exposés.

NOTATIONS

| | | |
|---------|---|-------|
| A_s % | allongement de l'acier à la ruine | |
| a | dimension de gorge des soudures | (mm) |
| f_y | limite d'élasticité nominale du métal de base | (MPa) |
| f_u | limite ultime nominale du métal de base | (MPa) |

1. INTRODUCTION

Lorsque des conditions favorables de travail sont réunies, le soudage constitue le moyen le plus économique de réaliser des assemblages résistants. C'est la raison pour laquelle les assemblages fabriqués en atelier sont habituellement soudés. Les assemblages réalisés sur chantier (montage) sont par contre généralement boulonnés ; une préparation préliminaire des assemblages en atelier - soudage de plats, etc. - est souvent effectuée en atelier en vue du boulonnage sur chantier.

Les [figures 1](#), [2](#) et [3](#) présentent des exemples d'assemblages soudés et leur mode de reprise des charges appliquées.

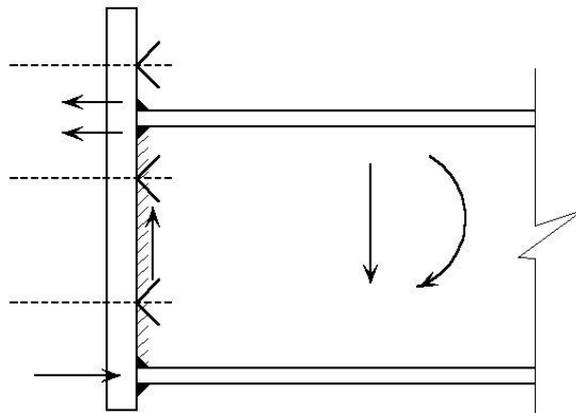
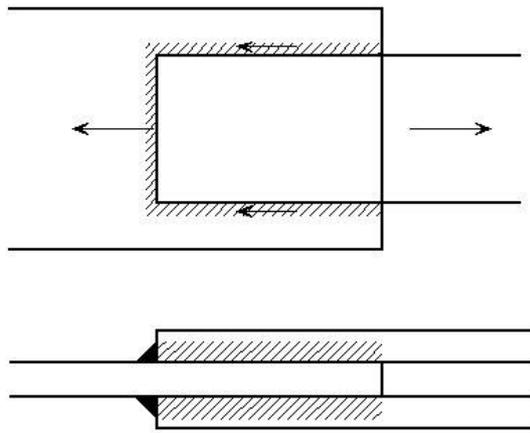


Figure 1 Welded connection between beam and end plate



The welds are assumed to carry forces proportional to their strength

Figure 2 Lap joint.

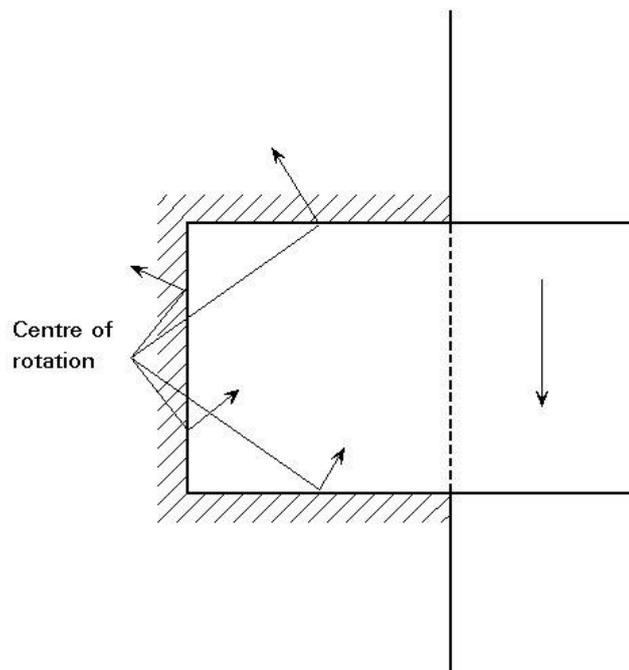


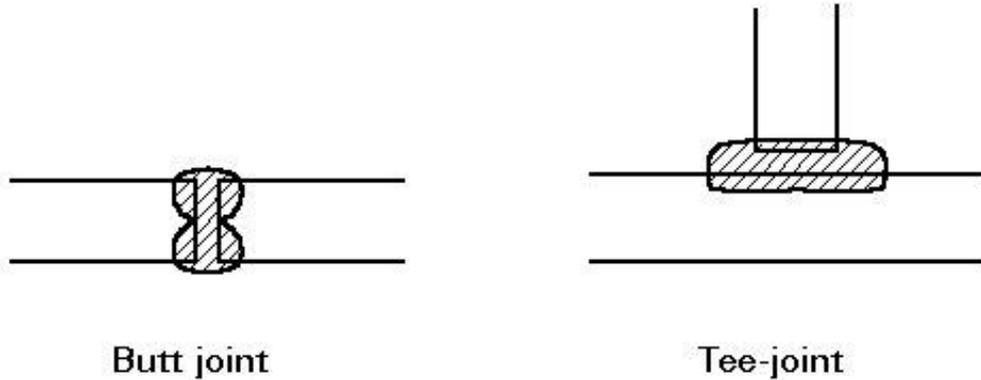
Figure 3 Eccentrically loaded weld group

2. TYPES DE SOUDURES

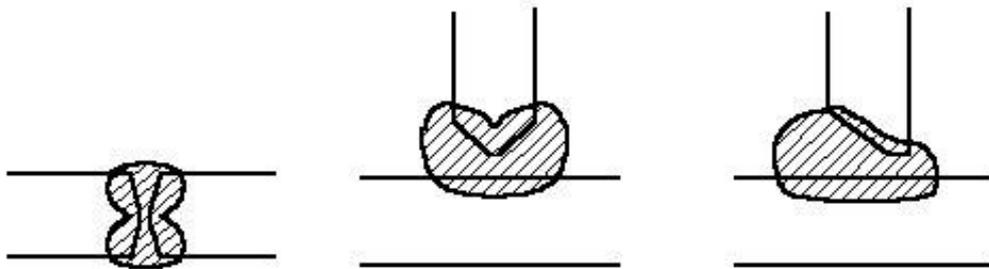
Dans la construction soudée de bâtiments, environ 80 % des soudures sont des soudures d'angle et 15 % des soudures en bout. Les 5 % restants sont des soudures en bouchon, en entaille et par points.

2.1 Soudures en bout

Une soudure en bout est réalisée sur l'épaisseur des plats aboutés dans un assemblage bout-à-bout ou en T. En règle générale, les bords des plats doivent être préparés avant soudage, voir [figure 4b](#). Dans certains cas, lorsque l'épaisseur des plats est inférieure à 5 mm, on peut se dispenser de cette préparation, voir [figure 4a](#).



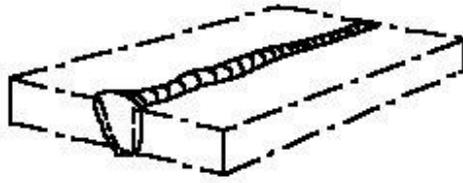
(a) No edge preparation



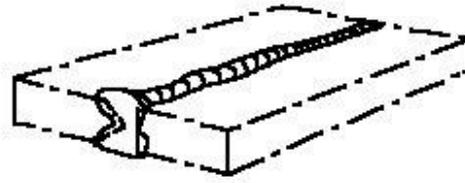
(b) Edge preparation

Figure 4 Butt welds with full penetration

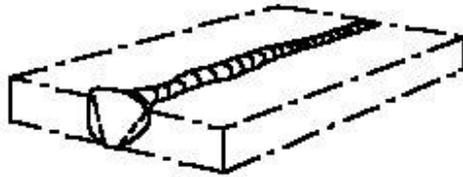
Les bords chanfreinés des plats peuvent, dans les soudures en bout, avoir des géométries très variées, voir [figure 5](#).



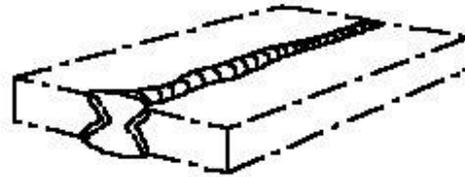
Single bevel butt weld



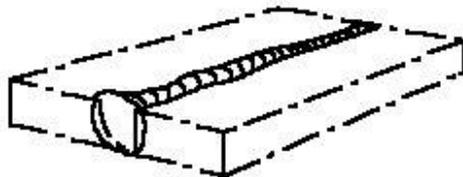
Double bevel butt weld



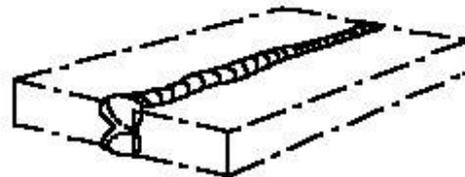
Single V butt weld



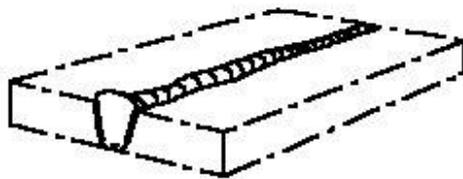
Double V butt weld



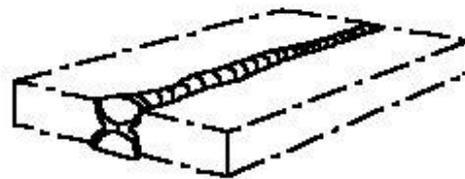
Single J butt weld



Double J butt weld



Single V butt weld



Double V butt weld

Figure 5 Types of bevelled edges

Pour les soudures en bout, une distinction est faite entre :

- la soudure en bout à pleine pénétration pour laquelle la pénétration et la fusion de la soudure et du métal de base est complète sur l'épaisseur de l'assemblage, voir [figure 4](#).
- la soudure en bout à pénétration partielle pour laquelle la pénétration de la soudure ne s'étend pas à l'épaisseur totale de l'assemblage, voir [figure 6](#).

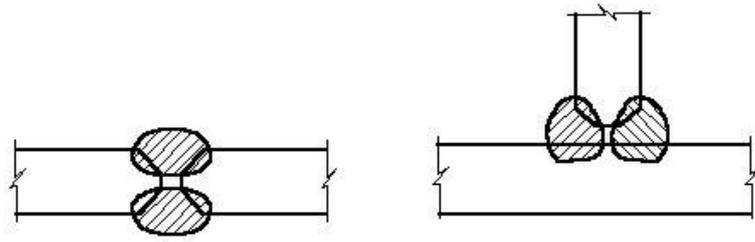


Figure 6 Butt welds with partial penetration

2.2 Soudures d'angle

Une soudure d'angle est une soudure dont la section transversale est approximativement triangulaire et qui est déposée à la surface des plats assemblés. Aucune préparation des bords n'est requise. Les soudures d'angle sont donc généralement moins onéreuses que les soudures en bout. Selon la position relative des pièces à assembler, trois types de disposition des soudures d'angle peuvent être envisagés :

- assemblage à recouvrement dans lequel les pièces à souder se trouvent dans des plans parallèles, voir [figure 7a](#),
- assemblage cruciforme ou en T dans lequel les pièces à souder sont plus ou moins perpendiculaires l'une par rapport à l'autre, voir [figure 7b](#),
- assemblage d'angle dans lequel les pièces sont plus ou moins perpendiculaires l'une par rapport à l'autre, voir [figure 7c](#).

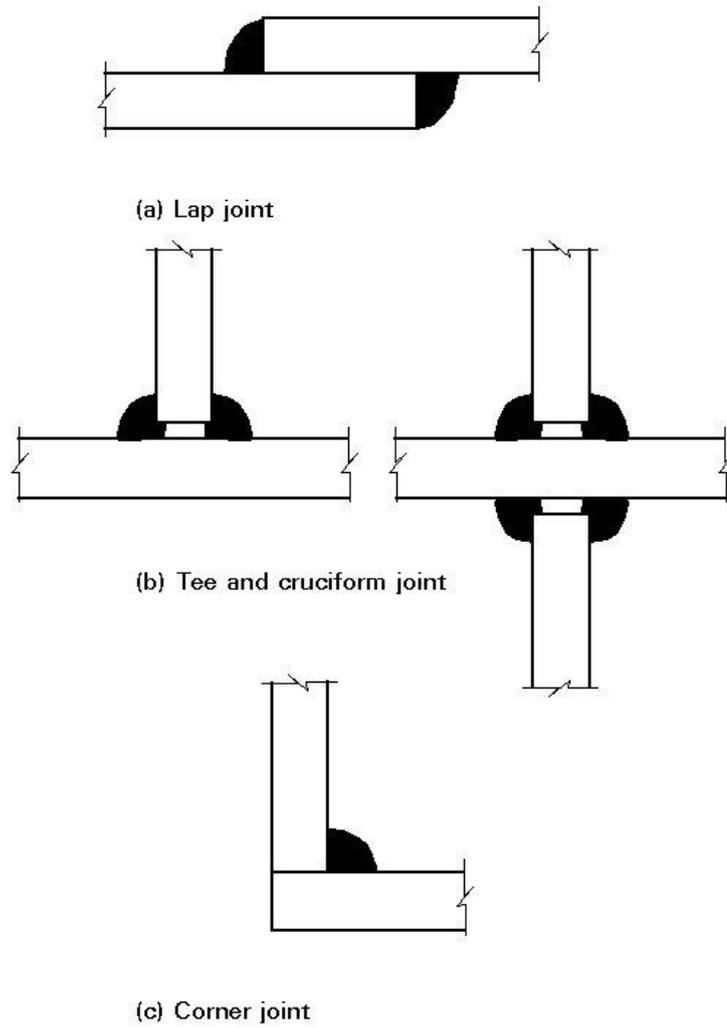


Figure 7 Fillet welds

- Afin d'améliorer la résistance et la rigidité de l'assemblage, des soudures en bout sont généralement préférées, voir [figure 8](#).

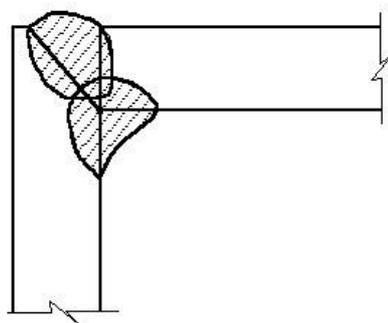


Figure 8 Corner joint with butt and fillet welds

Les soudures d'angle qui peuvent être déposées en un seul passage sont particulièrement économiques ; en atelier, cela signifie que la soudure ne doit pas excéder 8 mm mais, sur chantier, cette valeur doit être réduite, par exemple à 6 mm.

2.3 Soudures en bouchon et en entaille

Les soudures en entaille et en bouchon, voir [figure 9](#), sont rarement utilisées dans les structures de bâtiment. Elles ont pour fonction principale d'empêcher le voilement ou la séparation des plats qui se recouvrent.

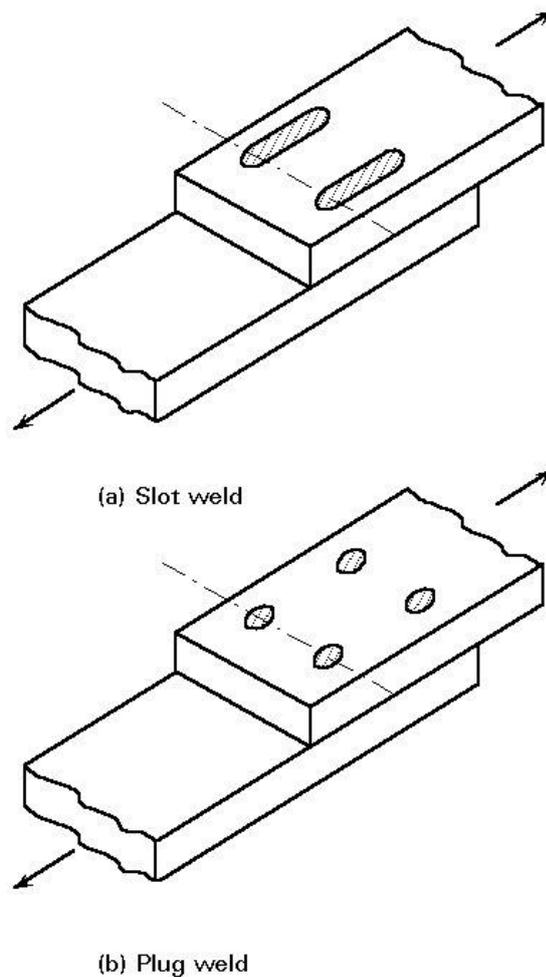


Figure 9 Slot and plug welds

2.4 Soudures par points

Les soudures par points sont rarement utilisées dans les structures de bâtiment.

Les pièces à assembler, qui doivent être peu épaisses, sont mises en contact par l'intermédiaire de deux électrodes, voir [figure 10](#). Un courant qui passe au travers des électrodes fait fondre localement les pièces ce qui, grâce à la pression de contact entre

les plats, crée un point de fusion commun aux pièces assemblées. Un ensemble aligné de points de fusion finit par constituer un assemblage.

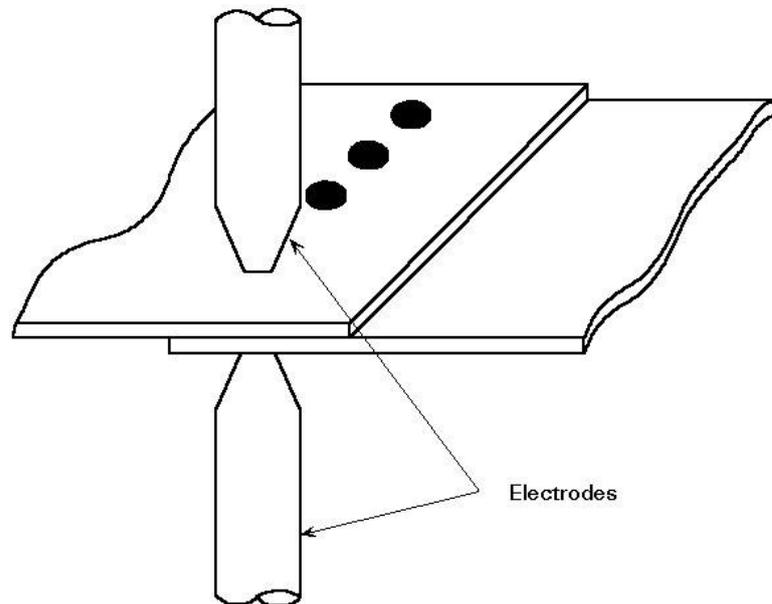


Figure 10 Spot welds

3. DESCRIPTION DES SOUDURES - DEFINITIONS

Dans ce chapitre, un certain nombre de termes souvent utilisés dans le domaine du soudage sont définis.

- Le **métal de base** est le matériau acier qui est soudé.
- Le **métal d'apport** ou **métal de soudure** est la matière dont est constituée l'électrode utilisée dans le processus de soudage.

La [figure 11](#) illustre la terminologie utilisée pour décrire les différentes parties de la soudure :

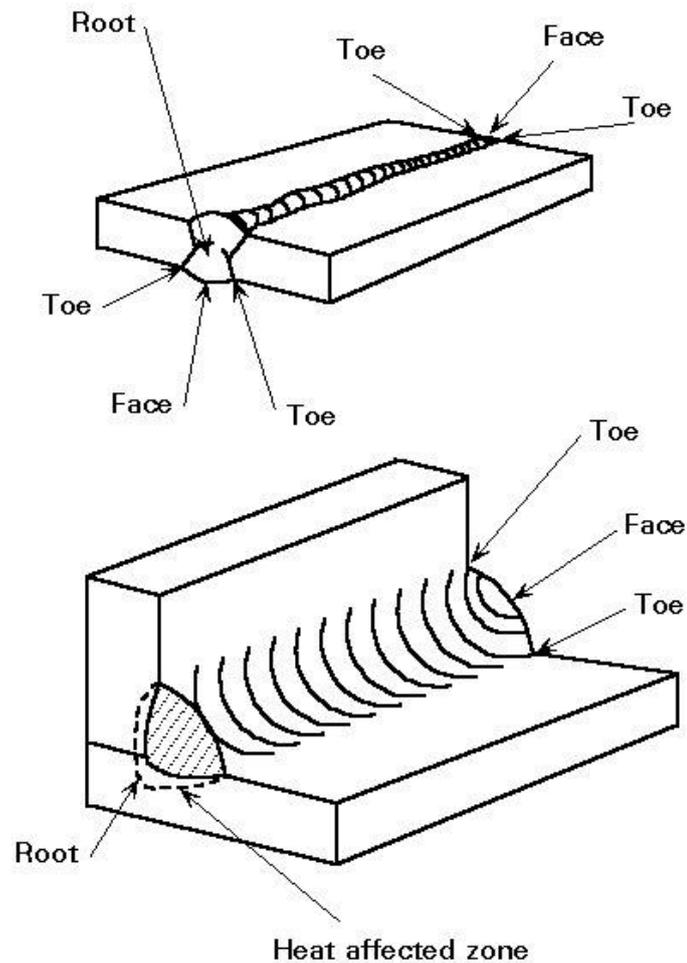


Figure 11 Various parts of welds

- la **racine** désigne l'endroit de l'assemblage jusqu'où le métal d'apport a pénétré.
- La **face** représente la surface extérieure de la soudure.
- Le **piéd** correspond à la ligne de séparation, sur la face de la soudure, entre le métal de base et le métal d'apport.
- La **zone affectée thermiquement** est la partie du matériau de base qui n'est pas rentrée en fusion avec le métal d'apport mais qui, par contre, a subi un échauffement et un refroidissement très rapides au passage de l'arc de soudage. Dans cette zone, le matériau de base est soumis à un durcissement et peut dès lors acquérir un comportement fragile.

La forme de la section transversale d'une soudure d'angle peut être convexe ou concave, voir [figure 12](#).

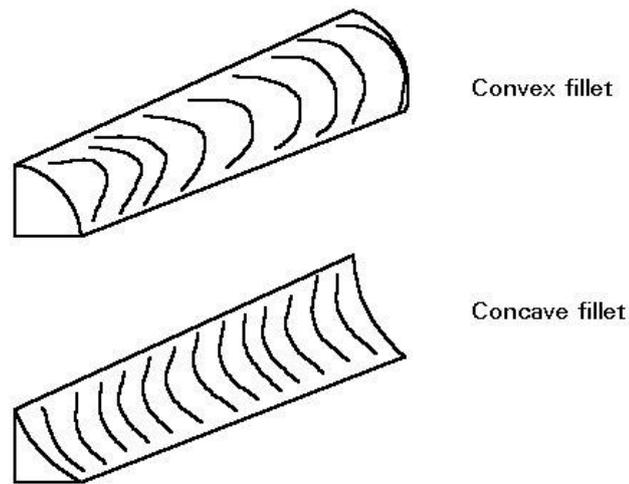


Figure 12 Convex and concave fillets

Pour le dimensionnement, deux grandeurs géométriques sont considérées :

- La **dimension de gorge**, a , représente la distance minimale de la racine à la face de la soudure, sans prise en compte de la zone convexe. La [figure 13](#) définit la dimension de gorge pour une soudure en bout et une soudure d'angle.

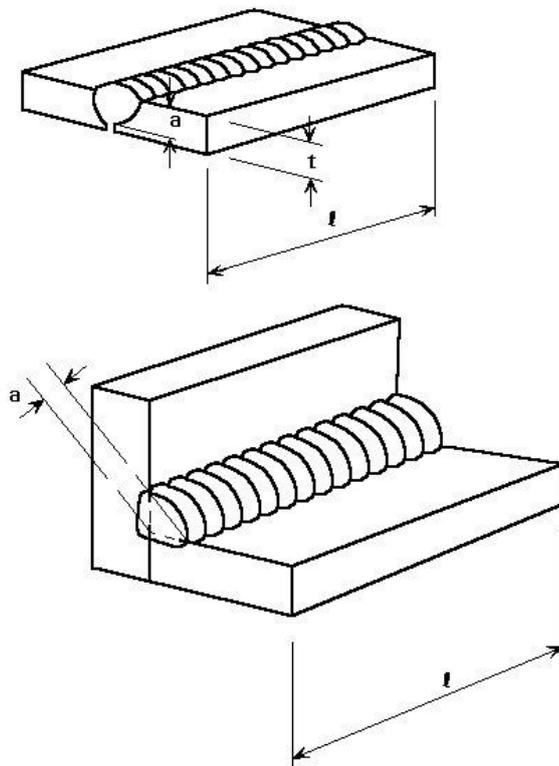


Figure 13 Throat thickness of welds

- La **longueur** est la dimension longitudinale de la soudure dans le sens du déplacement de l'arc de soudage. La [figure 13](#) montre des soudures pour lesquelles la longueur l correspond à la longueur totale des plats ; pour l'assemblage à recouvrement de la [figure 2](#), il serait la somme du double de la longueur de recouvrement et de la largeur du plat le plus étroit.

4. PROPRIETES MECANIQUES DES MATERIAUX

4.1 Métal de base

Le métal de base doit posséder les propriétés de soudabilité propres aux qualités de chaque nuance d'acier. La soudabilité d'un acier dépend de sa composition chimique et de ses caractéristiques métallurgiques. Ces aspects sont décrits à la [leçon 2.6](#).

Selon l'Eurocode 3 [1] et la norme EN 10025 [2], les nuances d'acier laminé à chaud S235, S275 et S355 de qualité B, C ou D conviennent, quel que soit le processus de soudage utilisé.

Les caractéristiques mécaniques adoptées dans les calculs sont la limite d'élasticité f_y et la contrainte ultime en traction f_u . De plus, dans le cas d'une analyse plastique, la déformation ultime de l'acier doit au moins être 20 fois supérieure à la déformation maximum élastique et l'allongement minimum A_S à la ruine doit au moins valoir 15 %. Ces valeurs caractéristiques sont fournies au tableau 1.

Tableau 1 - Propriétés mécaniques des aciers laminés à chaud.

| Nuance d'acier nominal | Épaisseur t | | | | | |
|------------------------|---------------|--------------|---------|------------------------|--------------|---------|
| | $t < 40$ mm | | | 40 mm $< t < 100$ mm | | |
| | f_y MPa | f_u MPa | A_S % | f_y MPa | f_u MPa | A_S % |
| Fe 360 | 235 | 360 | 26 | 215 | 340 | 24 |
| Fe 430 | 275 | 430 | 22 | 255 | 410 | 20 |
| Fe 510 | 355 | 510 | 22 | 335 | 490 | 20 |

La qualité B, C ou D d'un acier reflète la résistance au choc déterminée par un essai Charpy dans lequel est mesurée l'énergie nécessaire à rompre, lors du choc à une température donnée, une éprouvette entaillée en V. La classe de qualité indique si l'acier convient pour l'utilisation désirée. A titre d'exemple, un acier de qualité B, déterminée par essai Charpy à +20°C, convient pour des structures dans des conditions normales d'utilisation. Par contre, on aura recours à un acier de qualité D (essai Charpy à -20°C)

lorsque, par exemple, la structure est exposée à des températures basses en service, des sections épaisses d'acier sont utilisées et/ou lorsque la structure est soumise à des chocs.

4.2 Métal d'apport

Selon l'Eurocode 3, le métal d'apport doit posséder des propriétés mécaniques (limite d'élasticité, contrainte ultime, allongement à la ruine et énergie minimum lors d'un essai Charpy) égales ou supérieures à celles spécifiées pour la nuance de l'acier à souder.

Le choix du métal d'apport est, dans une large mesure, conditionné par le procédé de soudage, voir [leçons 3.3](#) et [3.4](#). Les principes de base sont les suivants :

- Les produits d'apport doivent être appropriés au procédé de soudage, au métal de base à souder et à la procédure de soudage adoptée.
- Les produits d'apport doivent être stockés et manipulés avec soin et conformément aux recommandations du fabricant.
- Les électrodes pour le soudage manuel à l'arc doivent être stockées dans leur emballage d'origine dans un endroit sec et chauffé, là où elles seront efficacement protégées des mauvaises conditions climatiques.
- Le flux en poudre doit être stocké et transporté dans des emballages qui le protègent de l'humidité.

5. PREPARATION DES BORDS ET AJUSTAGE

Un certain nombre d'aspects importants, qui sont décrits en détail aux [leçons 3.3](#), [3.4](#) et [3.5](#), sont résumés ci-après.

Un des procédés suivants de soudage à l'arc peut être utilisé :

- soudage à l'arc avec électrodes enrobées
- soudage à l'arc avec fil électrode fourré
- soudage à l'arc sous flux en poudre avec fil électrode
- soudage MIG (à l'arc sous protection de gaz inerte avec fil électrode fusible)
- soudage MAG (à l'arc sous protection de gaz actif avec fil électrode fusible).

Tous ces procédés peuvent être utilisés en atelier. Sur chantier par contre, on n'a d'habitude recours qu'au boulonnage ou au soudage à l'arc avec électrodes enrobées. Avec le procédé de soudage à l'arc, les soudures peuvent être réalisées dans n'importe quelle position. Les diverses positions des soudures sont reprises à la [figure 14](#), où la flèche indique la direction de l'arc pendant le soudage.

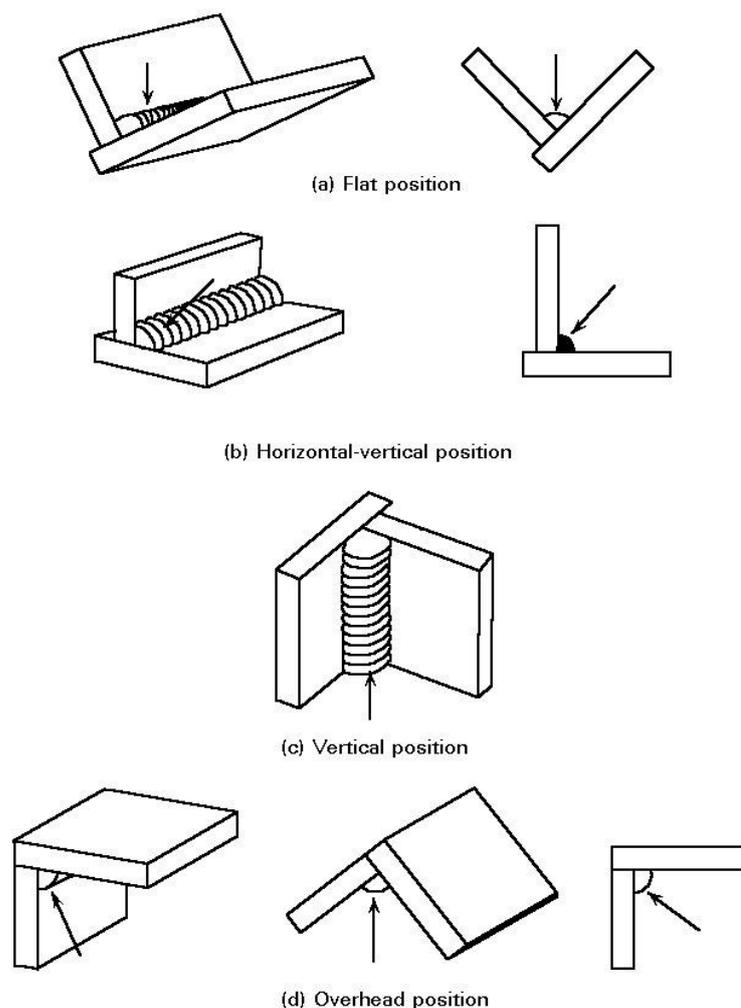


Figure 14 Weld positions

Il est évident qu'une soudure est plus facilement réalisée à plat et qu'elle offre la possibilité de déposer plus de métal que dans les autres positions ; c'est dans cette situation favorable que la dimension la plus grande de la soudure est obtenue à chaque passage. L'utilisation de produits d'apport habituels permet, dans cette position favorable, de réaliser en un passage une soudure d'angle dont la dimension de gorge est de 6 mm. Pour les soudures de dimension supérieure, plus d'un passage est nécessaire. Dans ce cas, les étapes de soudage doivent être planifiées avec attention, voir [figure 15](#).

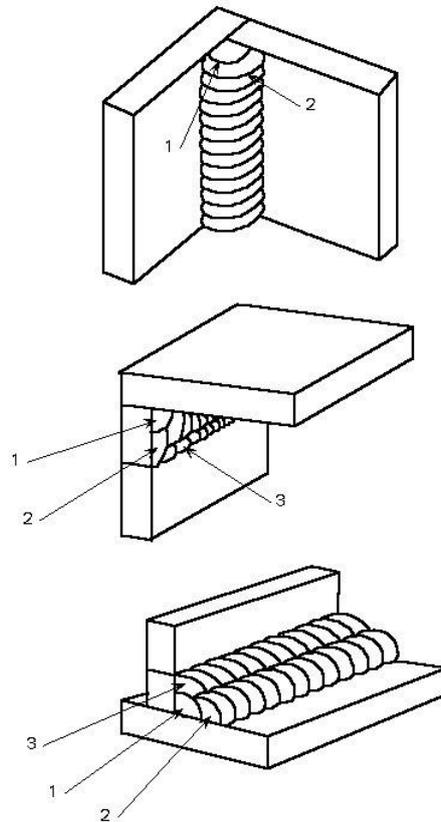


Figure 15 Welds with successive runs

Les conditions de soudage, en particulier les limitations actuelles du matériel de soudage limitent la profondeur de pénétration dans le matériau de base. Par exemple, si un assemblage dans lequel les plats sont intimement mis bout-à-bout (pas d'écartement entre les deux plats) est soudé de chaque côté en un passage, la pénétration peut ne pas être complète et la partie centrale de l'assemblage ne rentre alors pas en fusion ([figure 16a](#)). Si, par contre, un espace est ménagé entre les deux plats, la pleine pénétration peut être obtenue avec le même matériel de soudage. La limitation est, en fait, en relation avec l'épaisseur des plats à assembler. En pratique, la limite pour les soudures en bout de plats à bords rectangulaires, c'est-à-dire sans préparation particulière, est de 10 mm pour l'épaisseur de plats, avec un écartement de 5 mm. Lorsque l'épaisseur des plats est supérieure à cette valeur, il faut chanfreiner les plats et réaliser plusieurs passages pour obtenir une pénétration complète, voir [figure 16b](#).

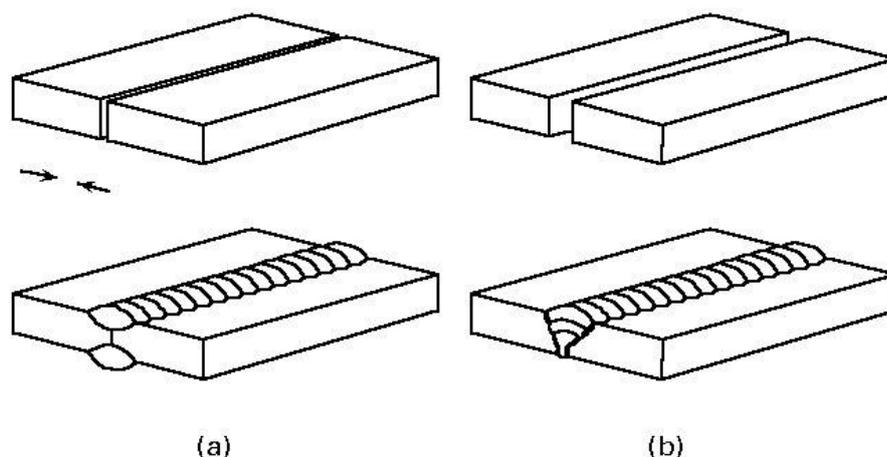


Figure 16 Effects of the gap on weld penetration

La préparation des plats consiste essentiellement dans le découpage et le chanfreinage des bords où la soudure doit être réalisée. Ces opérations peuvent s'effectuer par oxycoupage, par usinage ou par burinage ou meulage. Les surfaces des bords chanfreinés doivent être lisses, uniformes et exemptes de toute fissure et de rouille. Si l'oxycoupage ou un autre procédé susceptible de durcir l'acier est employé, il doit en être tenu compte dans la procédure de soudage choisie. Différentes formes de chanfreins sont décrites à la [figure 15](#). Des recommandations à caractère pratique, par exemple l'Annexe W de l'Eurocode 3 [1], fournissent des valeurs de tolérances pour différents types de soudures. Enfin, avant de souder, les bords et les surfaces adjacents à la soudure doivent être nettoyés pour ôter l'huile, la graisse, la peinture ou tout autre corps étranger susceptible d'affecter la qualité et la résistance de la soudure. La méthode et la procédure appropriée de soudage sont définies dans le cahier des charges fourni par le concepteur, voir [leçon 11.5](#).

6. QUALITE DES SOUDURES - DISCONTINUITES

Le contrôle de qualité représente, depuis des années, une part importante de l'activité industrielle. Le terme qualité couvre toutes les caractéristiques d'un produit qui sont susceptibles d'affecter sa capacité à remplir la fonction pour laquelle il est fabriqué. Dans les [leçons du Groupe 3](#), et plus particulièrement à la [leçon 3.4](#), l'attention est attirée sur le contrôle de qualité du soudage, en ceci compris la compétence des entreprises et la validation des procédures d'essais des soudures.

D'ordinaire, toutes les structures soudées font l'objet d'inspections au niveau des soudures. Le type et le degré d'inspection, ainsi que le choix des soudures à inspecter, sont définis en accord avec le cahier des charges.

Le but principal de l'inspection est de déceler d'éventuels défauts dans les soudures.

Des exemples de défauts sont illustrés à la [figure 17](#) :

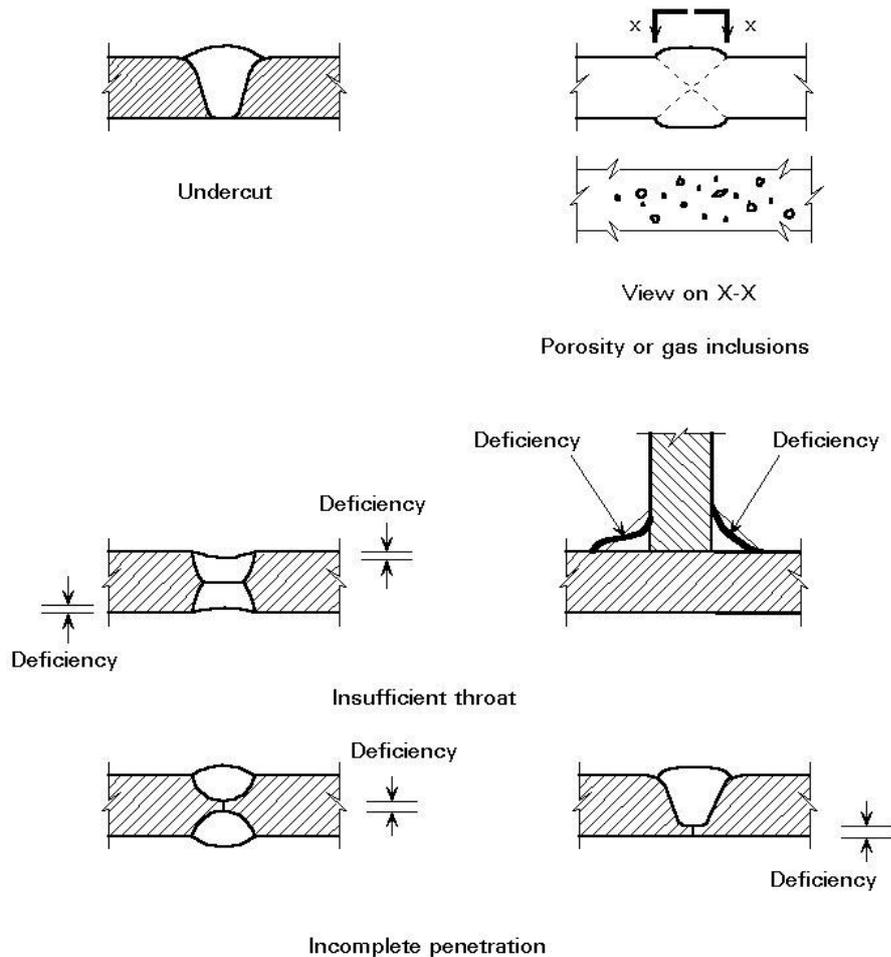


Figure 17 Examples of weld defects

- Caniveaux. L'épaisseur du métal de base est réduite au niveau du pied de la soudure ;
- Porosité ou inclusions de gaz. Des bulles d'air ou de gaz sont emprisonnées, après refroidissement, dans le métal de base ;
- Gorge insuffisante. La dimension de gorge est inférieure à celle de calcul. La résistance de l'assemblage peut être insuffisante ;
- Pénétration incomplète. La dimension de gorge est inférieure à celle de calcul. La résistance de l'assemblage peut être insuffisante.

Tous ces défauts peuvent être mesurés. Les codes à l'usage du praticien spécifient les tolérances admissibles pour chacun de ces défauts, comme par exemple l'Annexe W de l'Eurocode 3 [1].

7. CONCLUSION

- Lorsque les conditions favorables à sa mise en œuvre sont réunies, le soudage - principalement les soudures d'angle - représente la manière la plus économique d'assembler deux pièces en acier.
- Deux types de soudures sont couramment utilisés : les soudures d'angle et les soudures en bout. Partout où c'est possible, les soudures d'angle devront être choisies.
- De nombreux termes sont employés dès que l'on se réfère aux soudures. Dimension de gorge et longueur constituent les deux caractéristiques les plus importantes pour déterminer la capacité résistance des soudures.
- La compatibilité des propriétés physiques du métal d'apport (les électrodes) et du métal de base (les pièces à assembler) doit être assurée.
- Pour les soudures en bout, une préparation appropriée des bords est normalement requise.
- Les soudures doivent être inspectées pour déceler les éventuels défauts et ainsi s'assurer de leur capacité à remplir le rôle qui leur est réservé au sein de la structure.

8. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Eurocode 3 : "Design of steel structures" : ENV 1993-1-1 : General rules and rules for buildings, CEN, 1992.
- [2] En 10025 : European Standard 10025, Hot rolled products of non-alloy structural steels - technical delivery conditions.

9. LECTURES COMPLÉMENTAIRES

1. Bludgett, O.W., Welded Connections Chapter 3.3 Constructional Steel Design : An International Guide, 1992.
2. Pratt, J. L., Introduction to the Welding of Structural Steelwork, 3rd Revised Edition, 1989.

TRADUCTION DES FIGURES

[Figure 1](#) - Assemblage soudé entre une poutre et une platine d'extrémité

Les soudures sont supposées transmettre des efforts proportionnels à leur résistance

[Figure 2](#) - Assemblage à recouvrement

Centre de rotation

[Figure 3](#) - Ensemble de soudures chargées de manière excentrique.

Assemblage bout-à-bout

Assemblage en T

(a) Aucune préparation des bords

(b) Préparation des bords

[Figure 4](#) - Soudures en bout à pleine pénétration

Soudure en bout à simple chanfrein

Soudure en bout à double chanfrein

Soudure en bout en V simple

Soudure en bout en V double

Soudure en bout en J simple

Soudure en bout en J double

Soudure en bout en U simple

Soudure en bout en U double

[Figure 5](#) - Types de bords chanfreinés

[Figure 6](#) - Soudures en bout à pénétration partielle

(a) Assemblage à recouvrement

(b) Assemblage cruciforme et en T

(c) Assemblage d'angle

[Figure 7](#) - Soudures d'angle

[Figure 8](#) - Assemblage d'angle à soudures d'angle et en bout

(a) Soudure en entaille (b) Soudure en bouchon

[Figure 9](#) - Soudures en entaille et en bouchon

Électrodes

[Figure 10](#) - Soudures par points

Racine Pied Face Zone thermiquement affectée

[Figure 11](#) - Différentes parties des soudures

Soudure d'angle convexe Soudure d'angle concave

[Figure 12](#) - Soudures d'angle convexe et concave

[Figure 13](#) - Dimension de gorge des soudures

(a) Position à plat (b) Position horizontale-verticale

(c) Position verticale (d) Position renversée

[Figure 14](#) - Positions pour souder

[Figure 15](#) - Soudures par passages successifs

[Figure 16](#) - Influences de l'écartement sur la pénétration des soudures

Caniveau Vue selon X - X Porosité ou inclusions de gaz

Défaut Gorge insuffisante Défaut Pénétration incomplète

[Figure 17](#) - Exemples de défauts dans les soudures