

# Constructions métalliques

## Assemblages par soudage

par **Jean-Pierre MUZEAU**

*Ancien élève de l'École Normale Supérieure de Cachan*

*Docteur d'état ès Sciences Physiques*

*Professeur des Universités*

*Responsable du Département Génie Civil du CUST, Institut des Sciences de l'Ingénieur de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand*

|   |                     |
|---|---------------------|
| <b>1. Procédés de soudage .....</b>                               | <b>C 2 522 - 2</b>  |
| 1.1 Terminologie de la soudure .....                              | — 2                 |
| 1.2 Procédés utilisés et domaines d'emploi .....                  | — 2                 |
| 1.3 Phénomènes mécaniques et thermiques associés au soudage ..... | — 4                 |
| <b>2. Types de soudures .....</b>                                 | <b>— 5</b>          |
| 2.1 Soudures bout à bout .....                                    | — 6                 |
| 2.2 Soudures d'angle .....  | — 6                 |
| 2.3 Soudures en bouchon et en entaille .....                      | — 6                 |
| 2.4 Soudures par points .....                                     | — 6                 |
| <b>3. Calcul des cordons de soudure .....</b>                     | <b>— 6</b>          |
| 3.1 Calcul des soudures bout à bout .....                         | — 6                 |
| 3.2 Calcul des cordons d'angle .....                              | — 7                 |
| 3.3 Calcul des soudures en entaille et en bouchon .....           | — 9                 |
| <b>4. Goujons soudés .....</b>                                    | <b>— 9</b>          |
| <b>Pour en savoir plus .....</b>                                  | <b>Doc. C 2 523</b> |

**L**es articles de Constructions métalliques concernant les procédés d'assemblage ont été subdivisés en plusieurs parties :

- [C 2 520] « Moyens d'assemblage » ;
- [C 2 521] « Assemblage par procédés mécaniques » ;
- [C 2 522] « Assemblage par soudage » ;
- [Doc. C 2 523] « Pour en savoir plus ».

Les **techniques de soudage** ont considérablement évolué depuis quelques années à tel point qu'aujourd'hui en France, il est devenu extrêmement rare de trouver des boulons dans les ponts métalliques.

Il existe trois méthodes principales pour créer la chaleur nécessaire au soudage :

- la flamme oxyacétylénique ;
- la résistance au passage d'un courant ;
- l'arc électrique.

Chaque méthode produit un bain d'acier en fusion que l'on doit protéger de la contamination atmosphérique. La méthode utilisée pour réaliser cette protection a une influence prépondérante sur les caractéristiques du mode opératoire.

Le chalumeau oxyacétylénique est plutôt utilisé pour le découpage des éléments (bien qu'aujourd'hui les procédés au plasma deviennent de plus en plus courants).

Les procédés par résistance trouvent une application dans le soudage par points des éléments minces.

Pour l'acier de structure, les modes opératoires les plus couramment utilisés sont basés sur l'arc électrique. C'est celui qui est exposé ci-après.

## 1. Procédés de soudage

L'opération de soudage par **fusion avec fil-électrode fusible** consiste à faire fondre un métal d'apport en même temps que les plats ou les profilés à assembler. Le métal fondu provenant de chaque élément est réuni au niveau du joint dans un bain de métal qui comble l'interface. Au fur et à mesure que le bain de fusion se refroidit, le métal fondu qui se trouve à la limite de fusion se solidifie, formant un lien solide avec le métal de base. Quand la solidification est totale, il y a continuité du métal à travers le joint.

Dans le soudage à l'arc, on peut utiliser un flux ou un gaz non réactif (inerte) pour recouvrir le bain de fusion et donc empêcher l'action de l'air.

### 1.1 Terminologie de la soudure

#### ■ Terminologie des différentes zones des soudures

Les termes utilisés pour caractériser un cordon de soudure sont les suivants (figure 1) :

- le **métal de base** est le matériau constitutif des éléments à souder ;
- le **métal d'apport** est la matière dont est constituée l'électrode utilisée dans le processus de soudage ;
- 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 **pied** 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** (ou **ZAT**) 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.

#### ■ Terminologie suivant la position du cordon pendant le soudage

Suivant la position du cordon pendant le soudage, les différents cordons prennent des noms différents (figure 2).

### 1.2 Procédés utilisés et domaines d'emploi

Les procédés utilisés peuvent être classés en trois catégories :

- le soudage manuel qui reste le seul moyen possible pour réaliser des soudures dont l'accès est difficile ou de petite longueur ;
- le soudage semi-automatique (avancement automatique de l'électrode avec une torche tenue à la main). C'est celui qui est appliqué de manière générale ;
- le soudage automatique (la tête de soudage est montée, soit sur un chariot dont l'avancement est automatique, soit sur un

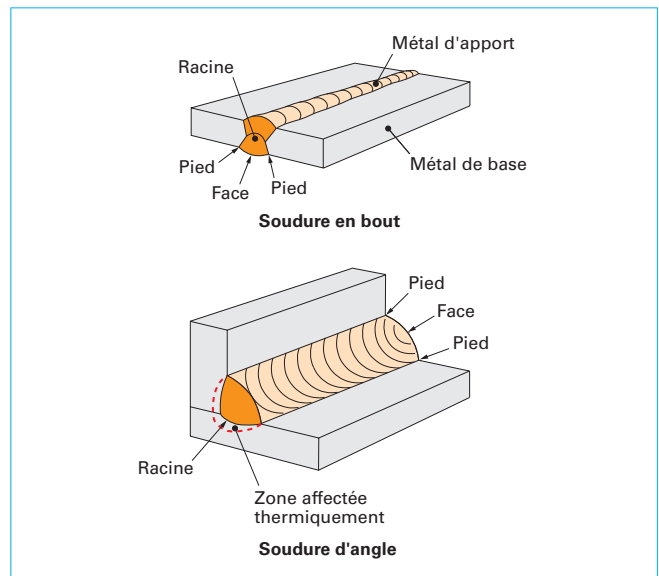


Figure 1 – Terminologie employée pour les soudures

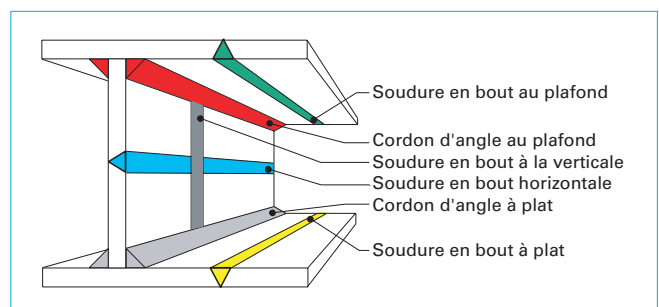


Figure 2 – Terminologie des cordons selon la position de soudage

robot de soudage). Il s'applique surtout aux soudures continues d'une certaine longueur : assemblage âme – semelles des profilés reconstitués soudés (PRS) par exemple.

#### 1.2.1 Soudage manuel avec électrode enrobée

Le soudage manuel (figure 3) constitue l'un des modes opératoires de soudage à l'arc les plus répandus. Il nécessite un personnel très qualifié pour que les soudures réalisées soient de bonne qualité. L'électrode est constituée d'un fil à cœur d'acier d'un dia-

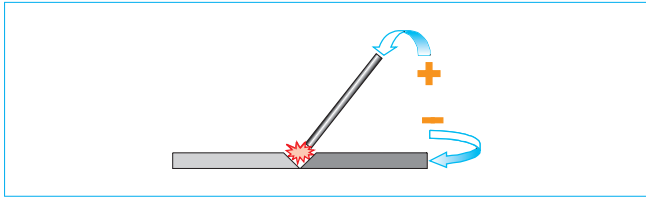


Figure 3 – Soudage à l'arc

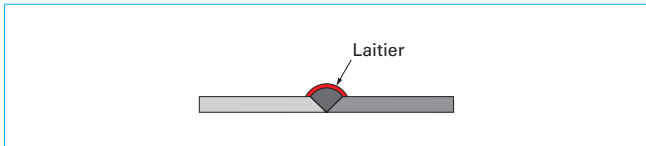


Figure 4 – Laitier

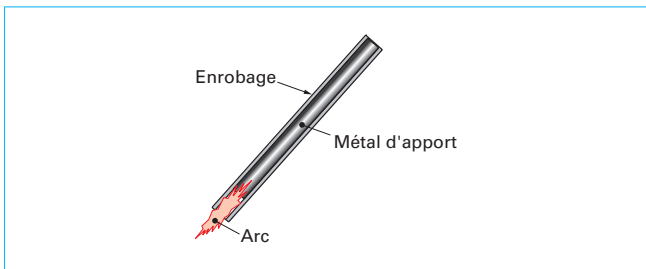


Figure 5 – Action de l'enrobage

mètre de 3 à 8 mm et d'un flux d'enrobage contenant des éléments alliés (manganèse et silice par exemple). La source de chaleur est constituée d'un arc de faible voltage (15 à 35 V) mais d'intensité élevée (jusqu'à 500 A). L'arc fait fondre le métal de base et l'électrode. Au fur et à mesure que le métal est transféré du bout du fil en acier au bain de fusion, le soudeur déplace l'électrode de manière à garder une longueur constante à l'arc. Cela est essentiel dans la mesure où la largeur du cordon est en grande partie liée à la longueur de l'arc. Le flux fond avec le fil de cœur et coule sur la surface du bain de fusion pour former un laitier qui doit être enlevé après la solidification (figure 4).

Cette technique présente les **avantages suivants** :

- faibles investissements ;
- liberté de mouvement (on peut l'utiliser jusqu'à 20 m de l'alimentation électrique, ce qui est intéressant sur chantier) ;
- utilisation possible dans toutes les positions ;
- convient pour des aciers au carbone et les aciers inoxydables.

Son **principal inconvénient** est un **faible cycle de travail**, c'est-à-dire qu'il n'y a qu'un faible volume de métal déposé avant que le soudeur ne s'arrête pour insérer une autre électrode. Cela ne constitue pas un problème pour des soudures courtes, mais devient un problème pour des soudures longues, en particulier lorsque les coûts de main-d'œuvre sont élevés.

Les caractéristiques d'action de l'électrode sont contrôlées par la composition du flux d'enrobage. Une grande variété d'électrodes est disponible selon les applications envisagées. On choisit l'intensité du courant compte tenu du diamètre du fil utilisé. Lorsqu'il est nécessaire d'avoir un bain de fusion à bas hydrogène, afin d'éviter la fissuration de la ZAT lors du refroidissement, il faut étuver et entreposer les électrodes à la température et pendant la durée recommandées par le fabricant. Avant sa fusion, l'enrobage permet un guidage de l'arc (figure 5). Après fusion, il réalise, sur la soudure, un écran thermique et chimique.

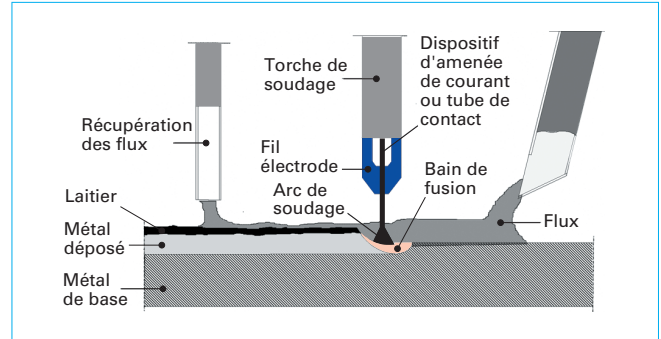


Figure 6 – Soudage à l'arc sous flux en poudre

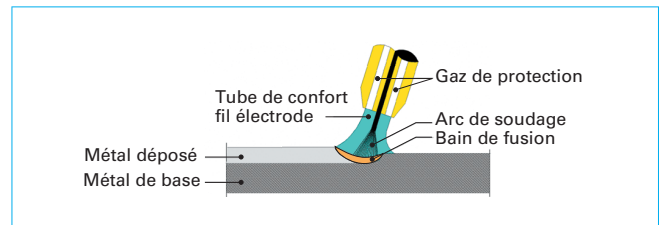


Figure 7 – Soudage sous flux gazeux

## 1.2.2 Procédés automatiques et semi-automatiques

### ■ Soudage sous flux solide en poudre

Il s'agit d'un procédé entièrement automatisé dans lequel la tête de soudage se déplace de façon automatique le long du joint (figure 6). L'électrode est constituée d'un fil nu dont l'avancement est commandé par un moteur asservi. Le flux, sous forme de particules, est déposé à la surface du joint. L'arc électrique est immergé sous la surface du flux dont il fond une partie pour former un laitier qui se solidifie immédiatement après en assurant la protection de la soudure. Le flux non fondu est récupéré et peut être réutilisé pour la soudure suivante.

Le soudage à l'arc sous flux en poudre nécessite généralement des intensités comprises entre 400 et 1 000 A. Ce procédé est particulièrement intéressant pour souder des joints longs (supérieurs à 1 m de longueur). Les vitesses de soudage élevées et l'opération en continu conduisent à une productivité élevée. La première exigence est, toutefois, d'avoir un accostage précis.

### ■ Soudage sous flux gazeux (procédés MIG, MAG et TAG)

Pour le soudage sous flux gazeux (figure 7), la protection vis-à-vis de l'atmosphère ambiante est obtenue par un gaz insufflé dans une buse concentrique à l'électrode. Si le gaz est inerte, il s'agit du procédé MIG (*Metal Inert Gas*). Si le gaz est actif, c'est le procédé MAG (*Metal Active Gas*). Enfin, pour certains métaux contenant beaucoup de nickel, il existe un procédé sous flux de gaz inerte mais pour lequel l'électrode est en tungstène et ne constitue pas le métal d'apport (ce dernier se présente par ailleurs sous forme de fil). Il s'agit du procédé TIG (*Tungsten Inert Gas*).

Le procédé MAG est un procédé semi-automatique, dans lequel la torche de soudage, située à l'extrémité d'un tube flexible, peut être tenue à la main et manipulée, mais toutes les autres opérations sont automatiques.

L'arc et le bain de fusion sont protégés par un gaz qui ne réagit pas avec l'acier fondu. En pratique, le gaz de protection est du dioxyde de carbone ou un mélange d'argon et de dioxyde de carbone. Le flux n'est pas nécessaire pour protéger le bain car les

éléments d'alliage sont dans le fil de l'électrode, mais on utilise parfois une électrode à flux fourré, afin de créer un laitier qui contrôle le profil de la soudure. Cela réduit la tendance à des défauts du type défaut de fusion ainsi que l'incidence de la porosité. La longueur de l'arc est commandée par l'alimentation électrique. Bien que le soudage MAG soit un peu plus facile que le soudage manuel, il faut une certaine compétence pour obtenir de bonnes conditions de soudage.

La manière dont le métal est transféré du fil de l'électrode vers le bain de fusion dépend de l'intensité du courant, du voltage et de la composition du gaz de protection. Lorsque l'intensité augmente, la forme du transfert change brutalement en un brouillard de fines gouttes qui sont envoyées à travers la longueur de l'arc par des forces électromagnétiques. Ce transfert est appelé « **transfert par pulvérisation** » et il autorise la réalisation du soudage en position opposée à la gravité. Si on change le gaz de protection par du dioxyde de carbone (en supposant que l'on ait des électrodes en acier), le transfert se fait en gouttes plus grosses et moins bien dirigées. On peut, cependant, renverser la situation en utilisant un mélange de gaz inerte et de dioxyde de carbone.

Quand on utilise des électrodes en acier, la réduction du voltage de l'arc et son intensité (en réduisant l'alimentation en fil-électrode), donne lieu à une forme de transfert connu sous le nom de transfert par « **grosses gouttes** » ou « **transfert par courts-circuits** ». Dans ce mode de transfert, le métal est fondu directement dans le bain, sans passer librement à travers la longueur de l'arc. Pour des voltages légèrement plus élevés, le transfert se fait à travers la longueur de l'arc, mais est constitué de gouttes plus grosses qui n'ont pas le caractère directionnel prononcé du transfert par pulvérisation. Le changement gouttes-brouillard est moins marqué avec l'acier qu'avec certains autres métaux.

Pour un soudage « **en position** », c'est-à-dire vertical et au plafond (figure 2), l'intensité doit être maintenue au-dessous de 180 A (de telle sorte que le soudage se fasse en mode « grosses gouttes ») et les vitesses de soudage sont comparables à celles du procédé manuel. La durée totale de réalisation d'un joint et donc la productivité sont meilleures (dans la mesure où il n'y a pas à enlever de laitier, ni à changer d'électrode). En **position à plat**, on peut utiliser des intensités jusqu'à 400 A (« transfert par pulvérisation ») pour obtenir des vitesses de soudage élevées. Le soudage MAG convient particulièrement pour des joints de cordons d'angles courants (assemblages poutre – poteau et raidisseur – plat par exemple). Il n'est pas facile à utiliser sur chantier en raison des problèmes liés au déplacement de l'équipement et du besoin de fournir des écrans pour éviter de perdre du gaz de protection en raison des courants d'air.

#### ■ Choix du procédé

Quand on veut choisir un procédé de soudage, il est nécessaire de prendre en compte un certain nombre de facteurs :

- l'épaisseur du matériau à souder ;
- l'endroit où la soudure doit être faite. Les procédés sous flux en poutre et MAG conviennent mieux à l'environnement protégé de l'atelier de fabrication. Le procédé manuel peut, plus facilement, être utilisé sur chantier ;
- la précision de l'accostage et les possibilités de mauvais alignement. Les procédés sous flux en poudre en MAG avec transfert par pulvérisation requièrent une bonne présentation des pièces ; ils sont particulièrement sensibles à la variation de l'écartement à la racine et/ou aux dimensions de la surface de la racine ;
- l'accès au joint. Il est nécessaire de s'assurer qu'à la fois l'équipement de soudage et la torche ou la tête de soudage peuvent être positionnés correctement ;
- la position de soudage. Les procédés sous flux en poutre et MAG avec « transfert par pulvérisation » ne conviennent pas pour du soudage vertical ou en position plafond. Le procédé MAG avec « transfert par grosses gouttes » est acceptable pour du soudage vertical ou en position plafond, mais le procédé manuel est probablement le meilleur pour des travaux en position plafond, en particulier sur site ;

— la composition de l'acier. Les aciers ayant une faible valeur d'équivalent carbone sont plus volontiers soudables et nécessitent des niveaux de préchauffage plus faibles ;

— le coût comparé. On peut calculer le prix par unité de longueur de soudure mais il dépend du coefficient de fusion du procédé et on doit considérer les différences dans les cycles de travail (temps inoccupé entre les électrodes pour le procédé manuel).

### 1.2.3 Structure et propriétés des soudures

Le métal fondu solidifié possède une structure de matériau moulé et des propriétés propres aux aciers coulés, c'est-à-dire un rapport de la limite d'élasticité à la résistance ultime plus grand que celui de l'acier de structure. Le métal fondu est un mélange de métal de base et d'acier provenant de l'électrode. Pour l'acier de structure, la composition de l'électrode est choisie généralement de telle sorte que le métal fondu qui en résulte soit plus résistant que les éléments à assembler. Éventuellement, des conditions particulières peuvent passer outre ce choix.

**Exemple** : quand on veut souder de l'acier inoxydable et de l'acier au carbone – manganèse, on utilise une électrode en acier hautement allié afin d'éviter les fissures dans le métal fondu.

Quand le bain de fusion se refroidit et se solidifie, la plus grande partie de la chaleur s'écoule à travers le métal de base le long du joint. L'acier est alors soumis à des **cycles d'élévation de température et de refroidissement** analogues à ceux conférés par un traitement thermique. Dans cette zone, la structure de l'acier est modifiée. Cet effet doit être pris en compte dans la conception, en termes de résilience.

Le contrôle de la ZAT se fait par :

- la composition de l'acier (équivalent carbone) ;
- la vitesse de refroidissement qui elle-même dépend :
  - de l'énergie de l'arc, c'est-à-dire l'énergie linéaire de soudage sur le joint,
  - du type de joint,
  - de l'épaisseur de l'acier,
  - de la température du plat ou du profilé avant le soudage, par exemple le préchauffage.

En plus de son effet sur la vitesse de refroidissement, on utilise le **préchauffage** pour :

- disperser l'hydrogène du bain de fusion et de la ZAT. La présence d'hydrogène dans la ZAT augmente le risque de fissure s'il y a trempe. L'hydrogène provient principalement du flux. Une électrode appropriée, stockée correctement, peut réduire le risque d'absorption de l'hydrogène ;
- enlever l'humidité de surface dans des conditions d'hygrométrie élevée ou sur le chantier ;
- amener l'acier à des conditions ambiantes normales (20 °C).

## 1.3 Phénomènes mécaniques et thermiques associés au soudage

Le soudage étant associé à la fusion de l'acier puis à son refroidissement, il s'accompagne nécessairement de phénomènes mécaniques (développement de retrait et introduction de contraintes résiduelles dans les pièces). Un risque de trempe est également présent.

### 1.3.1 Retrait thermique

Pendant son refroidissement, le métal chaud de la zone de soudage se contracte, conduisant au développement de retrait dans le joint. La contraction étant gênée par le métal froid qui entoure le joint, les contraintes qui se développent, supérieures à la limite d'élasticité, créent des déformations plastiques. Cela peut amener une déformation ou même une instabilité locale.

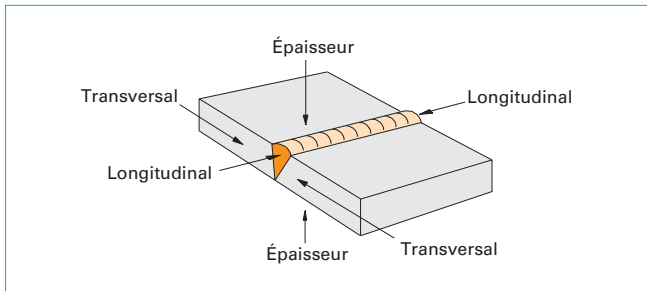


Figure 8 – Retraits présents dans un cordon de soudure

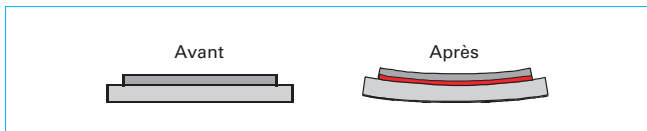


Figure 9 – Effets du retrait longitudinal

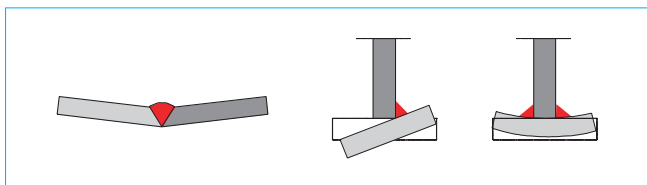


Figure 10 – Effets du retrait transversal

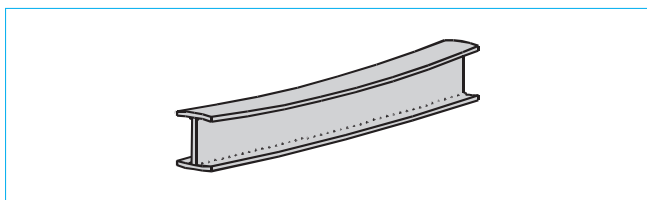


Figure 11 – Effets du retrait longitudinal et du retrait transversal combinés

Trois types de retrait sont présents : le retrait longitudinal, le retrait transversal et le retrait dans l'épaisseur (figure 8).

#### ■ Retrait longitudinal

Le retrait longitudinal peut conduire à une flexion des pièces. La figure 9 illustre le retrait longitudinal dans le cas du soudage d'un plat de renfort par exemple.

#### ■ Retrait transversal

Le retrait transversal (figure 10) provoque des déformations angulaires. Pour limiter ses effets, il convient de choisir judicieusement l'ordre des opérations de soudage ainsi que la dimension des cordons.

#### ■ Retrait dans l'épaisseur

Ce retrait est négligeable devant le retrait longitudinal et le retrait transversal.

#### ■ Combinaison des types de retrait

La figure 11 représente les effets des retraits longitudinal et transversal combinés dans le cas d'un profilé reconstitué par

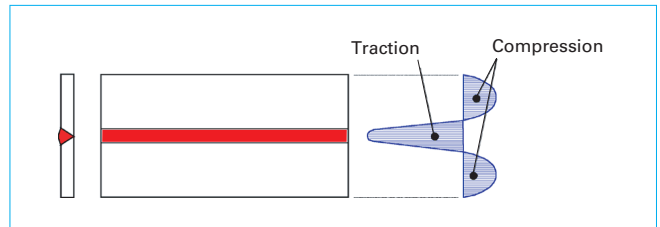


Figure 12 – Contraintes résiduelles dues au soudage

soudage de deux semelles sur une âme. Le retrait longitudinal est responsable du défaut de rectitude de la poutre alors que le retrait transversal provoque la courbure des semelles dans le sens transversal.

Les déformations de retrait peuvent être considérablement réduites par le choix d'une préparation des bords et d'un mode opératoire de soudages adéquats.

### 1.3.2 Présence de contraintes résiduelles

Quand la déformation plastique cesse, le joint est soumis à un diagramme de contraintes résiduelles avec de la traction dans le métal fondu et dans la ZAT et de la compression dans l'acier tout autour (figure 12).

### 1.3.3 Risque de trempe

La trempe d'un acier se développe lors de son refroidissement brusque à partir d'une température supérieure à 900 °C. Elle a pour conséquence de « figer » la structure cristalline du métal qui possède alors une dureté plus grande mais une plus grande fragilité.

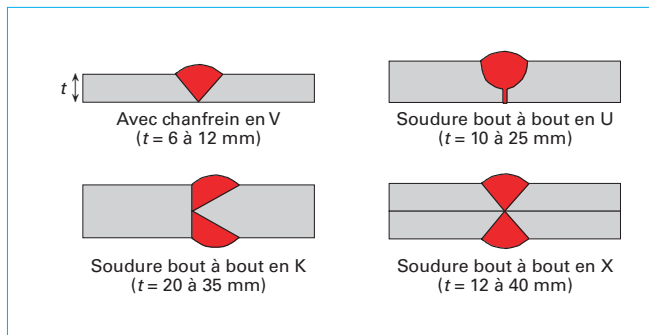
Dans le cas d'une opération de soudage, la température du cordon en fusion peut atteindre 1 300°C alors que le métal de base reste à température ambiante. L'acier ayant un fort coefficient de conduction thermique, il possède une grande capacité à absorber la chaleur et à permettre ainsi un refroidissement très rapide du métal de base. Les conditions de trempe sont alors réunies. Le cordon, mais aussi la ZAT sont susceptibles de subir la trempe.

La trempe du joint est très préjudiciable car la zone soudée devient fragile. Sachant qu'une rupture fragile est toujours plus dangereuse qu'une rupture ductile, il convient donc d'éviter que ce phénomène ne se produise. Pour supprimer le risque de trempe, trois techniques existent :

- le préchauffage : il consiste à chauffer le métal de base à une température d'environ 80 °C avant soudage de manière à ce qu'il y ait équilibre entre la quantité de chaleur du cordon et celle contenue dans le métal de base favorisant ainsi un refroidissement beaucoup plus lent du joint soudé ;
- le post-chauffage : la quantité de chaleur perdue par le cordon est partiellement restituée par un chauffage immédiat après soudage afin de limiter la vitesse de refroidissement ;
- la haute intensité électrique de soudage : une haute intensité électrique conduit à obtenir une grande quantité de chaleur dans le cordon et dans le métal de base, laquelle mettra plus de temps à être évacuée.

## 2. Types de soudures

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



**Figure 13 – Préparation des plats pour soudures bout à bout à pleine pénétration**

## 2.1 Soudures bout à bout

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

- la soudure bout à bout à pleine pénétration pour laquelle la pénétration et la fusion de la soudure et du métal de base sont complètes sur l'épaisseur de l'assemblage ;
- la soudure bout à bout à pénétration partielle pour laquelle la pénétration de la soudure ne s'étend pas à l'épaisseur totale de l'assemblage.

Une soudure bout à 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 (figure 13). Dans certains cas, lorsque l'épaisseur des plats est inférieure à 5 mm, on peut se dispenser de cette préparation.

## 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 bout à bout.

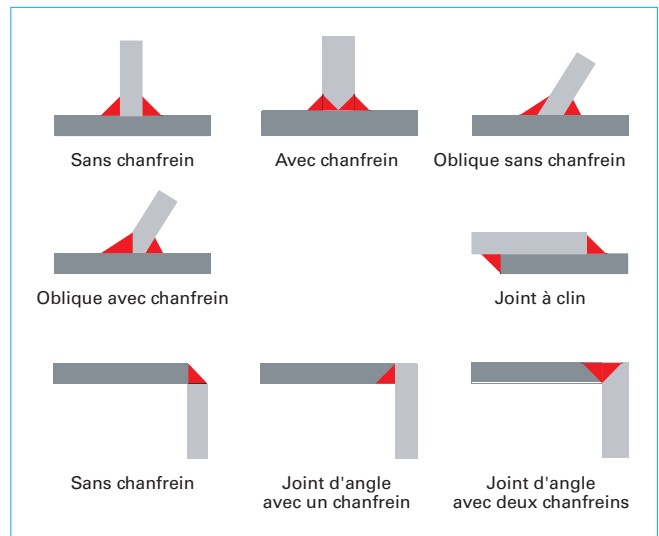
Selon la position relative des pièces à assembler, trois types de dispositions des soudures d'angle peuvent être envisagés (figure 14) :

- assemblage à recouvrement dans lequel les pièces à souder se trouvent dans des plans parallèles ;
- assemblage cruciforme ou en T dans lequel les pièces à souder sont plus ou moins perpendiculaires l'une par rapport à l'autre ;
- assemblage d'angle dans lequel les pièces sont plus ou moins perpendiculaires l'une par rapport à l'autre. Afin d'améliorer la résistance et la rigidité de l'assemblage, des soudures bout à bout sont généralement préférées.

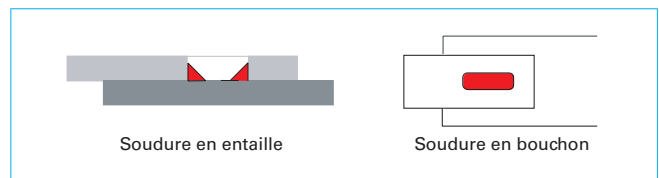
Les soudures d'angle qui peuvent être déposées en un seul passage sont particulièrement économiques. En atelier, cela signifie que l'épaisseur de la soudure ne doit pas excéder 8 mm. Sur chantier, cette valeur doit être réduite, par exemple à 6 mm.

## 2.3 Soudures en bouchon et en entaille

Les soudures en entaille et en bouchon (figure 15) 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 14 – Soudures d'angle**



**Figure 15 – Soudure en bouchon et soudures en entaille**

## 2.4 Soudures par points

Les soudures par points sont rarement utilisées dans les structures de bâtiment sauf pour assembler des éléments minces.

Les pièces à assembler sont mises en contact par l'intermédiaire de deux électrodes. 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.

# 3. Calcul des cordons de soudure

## 3.1 Calcul des soudures bout à bout

Si la procédure de soudage est correctement suivie, le métal d'apport des soudures bout à bout peut être assimilé au métal de base. Pour la détermination de la résistance de l'assemblage, le calcul est donc fondé sur l'aire de la section de gorge, c'est-à-dire de la zone de pénétration. En fonction de la pénétration, deux types de soudures bout à bout sont définies : soudures à pénétration complète ou partielle.

### 3.1.1 Soudures bout à bout à pénétration complète

Dans le cas d'une soudure bout à bout à pénétration complète, aucun calcul n'est nécessaire dans la mesure où la résistance du métal d'apport est au moins équivalente à celle du matériau de



base de l'élément assemblé le plus faible et le rayon de gorge est égal à l'épaisseur du plat. On peut simplement considérer que la soudure bout à bout se substitue au matériau de base.

### 3.1.2 Soudures bout à bout à pénétration partielle

Dans le cas d'une soudure bout à bout à pénétration partielle, la dimension de gorge à considérer est la profondeur de pénétration, légèrement réduite. Selon l'Eurocode 3, la dimension de gorge doit être prise égale à la profondeur de pénétration minorée de 2 mm ; dans cette définition, la profondeur de pénétration s'identifie à la profondeur du chanfrein. Si, par contre, des essais appropriés ont été réalisés, la dimension de gorge peut être choisie égale à la profondeur du chanfrein.

Un assemblage en T réalisé à l'aide d'une soudure bout à bout à pénétration partielle, à laquelle viennent se superposer des soudures d'angle, peut être considéré au même titre qu'une soudure bout à bout à pénétration complète si la dimension totale de gorge est supérieure à l'épaisseur du matériau à assembler et si l'écartement entre les soudures satisfait certaines conditions.

### 3.1.3 Distribution des contraintes dans les soudures bout à bout

Comme cela a été mentionné précédemment, on suppose, pour le calcul des soudures, que la distribution des contraintes est uniforme sur leur longueur. À l'état ultime, la redistribution plastique des contraintes rend cette hypothèse plus ou moins réaliste. Dans le domaine élastique (cas du calcul en fatigue), les contraintes ne sont pas uniformément distribuées, en particulier lorsque la limite d'élasticité du métal d'apport est nettement supérieure à celle du métal de base.

Considérons une barre soumise à un effort de traction. La barre s'allonge et, en raison de l'effet du coefficient de Poisson, sa dimension transversale initiale diminue. La contraction latérale est uniforme si la barre est homogène mais aux abords de la ligne de soudure, dont la limite d'élasticité est différente, la contraction latérale est moindre que dans le métal de base. Cet effet est la cause d'une distribution variable de contraintes le long de la soudure dans laquelle la contrainte de traction au centre est supérieure à la contrainte moyenne.

Pour l'ingénieur, une règle de bonne pratique est d'éviter les concentrations importantes de contraintes qui apparaissent aux angles vifs rentrants des assemblages entre pièces de sections transversales différentes. Éviter ces concentrations de contraintes est d'une importance toute particulière si l'assemblage est soumis à fatigue. Afin de réduire les concentrations de contraintes, la transition douce (par réduction progressive de l'épaisseur de la plus grosse pièce) d'une section à une autre est recommandée.

## 3.2 Calcul des cordons d'angle

### 3.2.1 Types de cordons d'angle selon la direction de l'effort

C'est la direction de l'effort à transmettre qui permet de distinguer le type de cordon à retenir pour le calcul (figure 16). Les cordons frontaux sont perpendiculaires à la direction de l'effort, les cordons latéraux sont parallèles et les cordons obliques sont orientés d'un angle quelconque.

### 3.2.2 Longueur efficace d'une soudure d'angle

La longueur efficace d'une soudure d'angle est la longueur sur laquelle la soudure possède sa pleine épaisseur. Cela peut être pris comme la longueur totale de la soudure réduite de deux fois la gorge utile  $a$ . Sous réserve que la soudure possède sa pleine

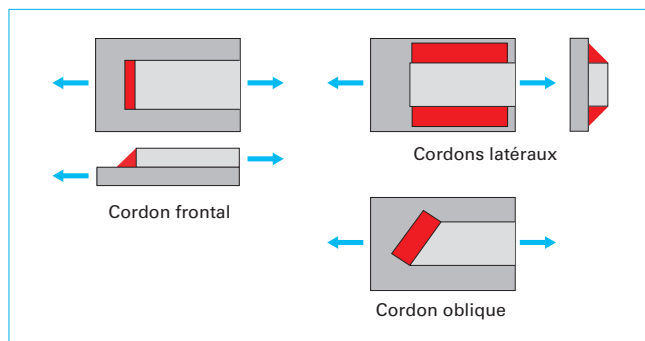


Figure 16 – Types de cordons d'angle selon la direction de l'effort

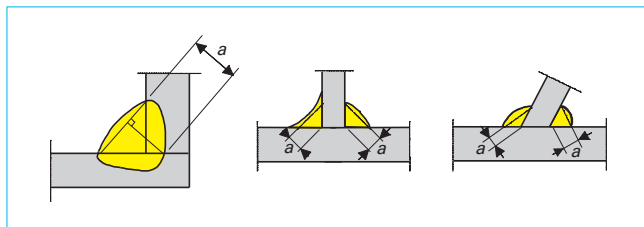


Figure 17 – Gorge d'un cordon de soudure

épaisseur sur toute sa longueur, y compris ses extrémités, il n'est pas nécessaire d'opérer une réduction de la longueur efficace pour le début ou pour la fin de la soudure.

Pour supporter un effort, il convient de ne pas prévoir de soudure d'angle d'une longueur efficace inférieure à 30 mm ou inférieure à 6 fois son épaisseur de gorge, en prenant la plus grande de ces deux valeurs.

### 3.2.3 Gorge utile

La gorge utile  $a$  d'une soudure d'angle est prise égale à la hauteur du plus grand triangle (à côtés égaux ou inégaux) pouvant s'inscrire à l'intérieur des faces à souder et de la surface de la soudure mesurée perpendiculairement au côté extérieur de ce triangle.

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 17 définit la dimension de gorge pour une soudure bout à bout et une soudure d'angle.

La gorge utile d'une soudure d'angle ne doit pas être inférieure à 3 mm. L'abaque de la figure 18 permet de choisir une épaisseur de cordon en fonction de l'épaisseur des tôles à assembler.

### 3.2.4 Résistance d'un cordon d'angle

Le calcul des soudures d'angle dépend des caractéristiques mécaniques et géométriques sous réserve que les propriétés mécaniques du métal d'apport soient compatibles avec celles du matériau de base.

La section résistante à considérer est représentée à la figure 19. L'aire de la section de gorge s'exprime comme étant le produit de la dimension de gorge par la longueur utile de la soudure. En règle générale, la longueur utile de la soudure est égale à la longueur totale du cordon d'angle tout entier, y compris les retours d'extrémités, si la soudure est continue. Pour les soudures longues et les soudures interrompues, la longueur utile peut être réduite.

Les soudures d'angle nécessaires à la transmission des efforts possèdent normalement un rayon  $a$  de gorge d'au moins 4 mm.

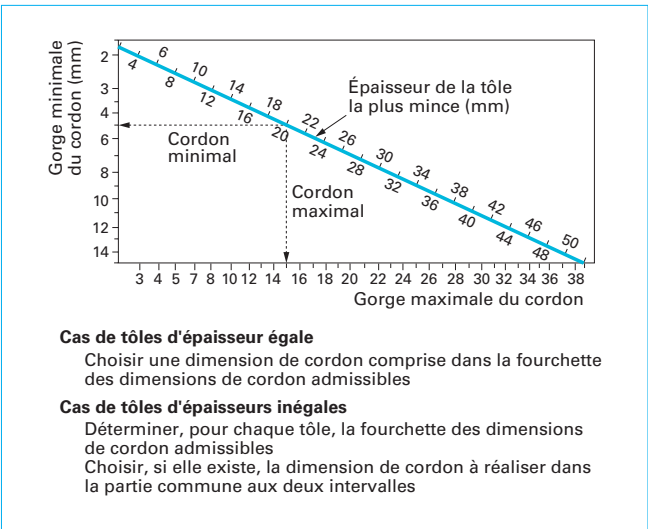


Figure 18 – Choix de la gorge en fonction des pièces assemblées

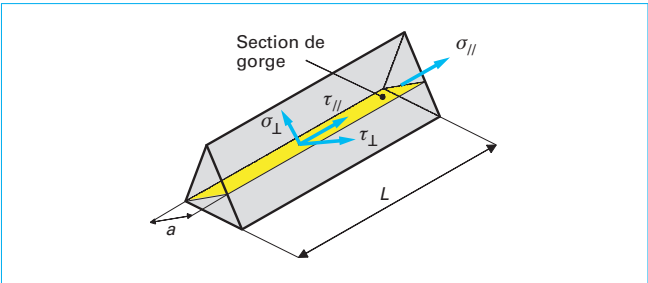


Figure 19 – Contraintes dans un cordon soudure

Les soudures dont la longueur utile est inférieure à la plus grande des deux valeurs suivantes, 40 mm ou 6 fois l'épaisseur de gorge, devraient être ignorées pour la reprise des efforts.

■ État de contraintes

L'état de contraintes qui réside dans le plan de gorge s'exprime en fonction des contraintes normale  $\sigma$  et tangente  $\tau$  qui peuvent se décomposer respectivement en  $(\sigma_{\perp}; \sigma_{\parallel})$  et  $(\tau_{\perp}; \tau_{\parallel})$ . Ces différentes contraintes sont représentées à la figure 19.

■ Méthode précise (ou méthode directionnelle)

La charge qui agit sur le cordon d'angle est décomposée en efforts parallèle et perpendiculaire à l'axe longitudinal de la soudure qui conduisent à des contraintes normales et transversales à la section de gorge. Les contraintes correspondantes (figure 20) peuvent être calculées selon les relations suivantes :

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{\sigma_{\perp}}}{aL} \text{ contrainte normale perpendiculaire à la gorge,}$$
$$\tau_{\perp} = \frac{F_{\tau_{\perp}}}{aL} \text{ contrainte tangente (dans le plan de gorge) perpendiculaire à l'axe de la soudure,}$$
$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{\tau_{\parallel}}}{aL} \text{ contrainte tangente (dans le plan de gorge) parallèle à l'axe de la soudure.}$$
$$\sigma_{\parallel} \text{ contrainte normale parallèle à l'axe de la soudure.}$$

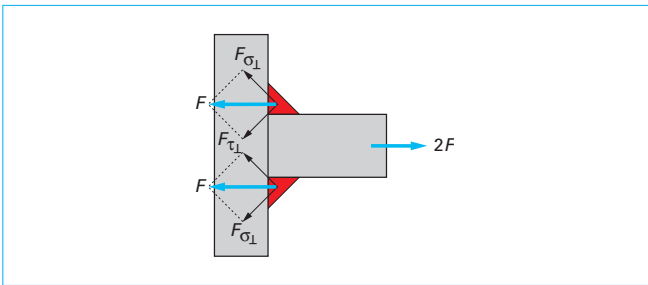


Figure 20 – Cordons d'angle

| Tableau 1 – Caractéristiques pour le calcul de la résistance d'une soudure d'angle au cisaillement |   |                                  |
|--|---|----------------------------------|
| Nuance d'acier   | Résistance ultime en traction $f_u$ (MPa) | Facteur de corrélation $\beta_w$ |
| S 235  | 360                                       | 0,8                              |
| S 275  | 430                                       | 0,85                             |
| S 355  | 510                                       | 0,9                              |
| S 460  | 550                                       | 1,0                              |

La contrainte normale  $\sigma_{\parallel}$  n'est pas prise en considération car la section transversale de la soudure est très petite et possède une résistance négligeable comparativement à la résistance de la section de gorge soumise à la contrainte de cisaillement  $\tau_{\parallel}$ .

L'application du critère de von Mises  $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$  fournit la valeur de la contrainte équivalente  $\sigma_{eq}$  dans la section de gorge de la soudure :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}$$

La soudure d'angle est adéquate si les conditions suivantes sont satisfaites :

$$\sigma_{eq} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

et

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

avec  $f_u$  résistance nominale ultime à la traction de la plus faible des pièces assemblées (tableau 1),

$\gamma_{M2}$  coefficient partiel de sécurité (cf [C 2 520, tableau 1]),

$\beta_w$  facteur de corrélation fonction de la nuance de l'acier utilisée (tableau 1).

■ Méthode simplifiée (ou méthode de la contrainte moyenne)

L'Eurocode 3 fournit également une expression simplifiée de vérification qui ne requiert pas la décomposition des efforts agissant sur la soudure. La formule est fondée sur la méthode dite de la contrainte moyenne qui assimile la résistance de soudure à la résistance en cisaillement et ce, indépendamment de la direction de l'effort appliqué. Comme la résistance la plus faible de la soudure est obtenue en cisaillement pur, la méthode de la contrainte moyenne se révèle toujours sécuritaire.



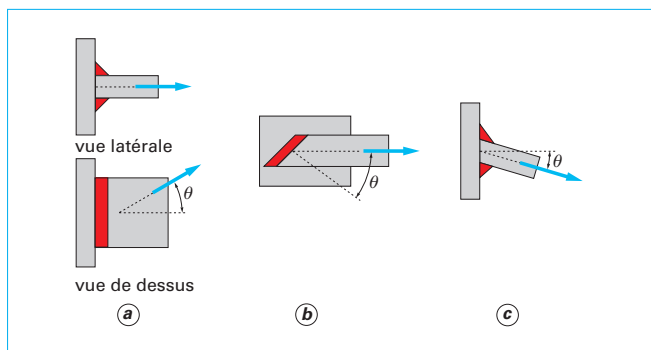


Figure 21 – Exemples de cordons obliques

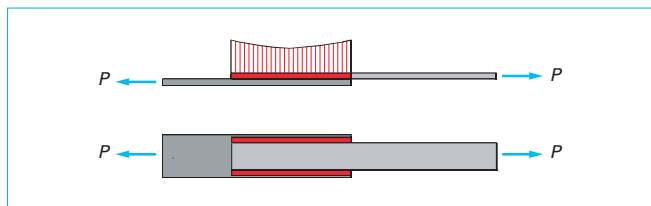


Figure 22 – Distribution des contraintes dans une soudure longue

Les soudures d'angle doivent satisfaire :

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} = f_{vw,d} a$$

avec  $F_{w,Ed}$  valeur de calcul de l'effort exercé dans la soudure par unité de longueur,

$F_{w,Rd}$  résistance de calcul de la soudure par unité de longueur,

$f_{vw,d}$  résistance de calcul en cisaillement de la soudure qui se détermine selon l'expression :  $f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2}}$ ,

$\gamma_{M2}$  coefficient partiel de sécurité (cf. [C 2 520, tableau 1]).

#### ■ Cordons obliques

Une soudure d'angle peut aussi être soumise à un chargement oblique. La figure 21 illustre quelques situations dans lesquelles les soudures sont soumises à ce type de chargement.

Si l'on se réfère à la méthode simplifiée, le dimensionnement des soudures soumises à chargement oblique s'avère très aisé puisque aucune différence n'est faite selon l'orientation de la soudure.

L'utilisation de la méthode directionnelle conduit à la procédure de dimensionnement suivante :

- la charge est décomposée en composantes parallèles et perpendiculaires à l'axe longitudinal de la soudure ainsi que normales et perpendiculaires à la section de gorge ;
- les composantes de contraintes,  $\sigma_{\perp}$ ,  $\tau_{\perp}$  et  $\tau_{\parallel}$  qui correspondent aux composantes de chargement sont évaluées ;
- les valeurs des composantes de contraintes sont introduites dans la formule de la contrainte équivalente  $\sigma_{eq}$  :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

#### ■ Soudures longues

La figure 22 illustre la distribution des contraintes dans les soudures longues d'assemblage à recouvrement. La distribution est

analogue à celle observée dans les joints rivetés ou boulonnés d'une certaine longueur.

Des contraintes importantes apparaissent aux extrémités de l'assemblage. À l'état ultime, juste avant la ruine, la déformation plastique aux abords des extrémités contribue à l'uniformisation des contraintes dans les soudures. Malgré cela, si l'assemblage est long, la distribution des contraintes n'est jamais parfaitement uniforme.

L'Eurocode 3 précise que la résistance de calcul d'une soudure longue d'un assemblage à recouvrement doit être réduite par un facteur  $\beta_{Lw}$  qui traduit les effets de la distribution non uniforme des contraintes. Si l'assemblage à recouvrement est plus long que 150 a :

$$\beta_{Lw} = 1,2 - \frac{0,2 L_j}{150 a} \leq 1$$

avec  $L_j$  longueur totale du recouvrement dans le sens de la transmission des efforts.

### 3.3 Calcul des soudures en bouchon et en entaille

La résistance des soudures en entaille et en bouchon est calculée par la méthode de la contrainte moyenne. Lors du calcul, l'aire utile de la soudure en entaille ou en bouchon est prise égale à l'aire de l'entaille ou du trou.

## 4. Goujons soudés

Rappelons que les connecteurs sont utilisés pour permettre de développer le comportement mixte entre la poutre en acier et le béton. La connexion est essentiellement prévue pour résister au cisaillement horizontal et est appelée « connexion au cisaillement ».

Deux types de connecteurs principaux sont disponibles, les goujons soudés et les connecteurs cloués. Les seconds sont présentés dans l'article [C 2 521]. Les premiers, étant assemblés par soudage, sont présentés ici.

Dans les pays industrialisés, le goujon soudé est le plus usuel des connecteurs de cisaillement (figure 23). Il peut être soudé sur la semelle supérieure de manière semi-automatique soit directement à l'atelier, soit au travers des tôles profilées en acier sur le chantier.

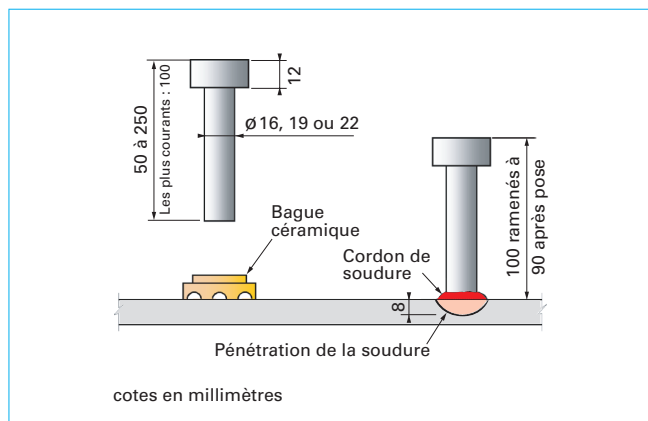


Figure 23 – Connecteurs soudés

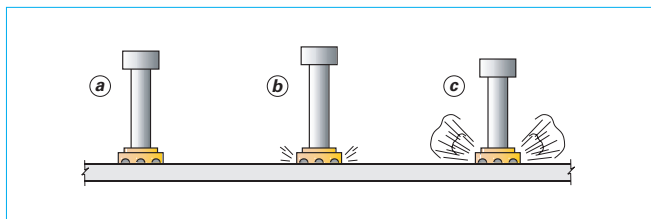


Figure 24 – Mise en œuvre des goujons soudés

C'est une variante du soudage à l'arc dans laquelle des goujons sont soudés de façon automatique sur des surfaces planes (figure 24). Le goujon qui peut être un barreau lisse ou fileté (s'il est lisse, il doit avoir une tête), constitue l'électrode et est tenu

dans le mandrin d'un pistolet de soudage connecté à une alimentation électrique. Le goujon est tout d'abord mis en contact avec la surface d'un plat en acier ou d'un profilé (a). Dès que le courant est mis, le goujon est automatiquement écarté de manière à ce que s'établisse un arc électrique (b). Quand le bain de fusion s'est formé et que le bout du goujon est fondu, il est automatiquement enfoncé dans le plat en acier et le courant est coupé (c). Le métal fondu qui est expulsé de l'interface est disposé en bourrelet au moyen d'un collier en céramique, placé autour de l'arc du goujon au début de l'opération. Cette collerette sert aussi à fournir une protection suffisante contre la contamination atmosphérique.

Le soudage des goujons offre une méthode précise et rapide d'attache de connecteurs au cisaillement, avec le minimum de déformation. Alors qu'il nécessite une certaine compétence pour établir les paramètres de soudage (voltage, intensité du courant, durée et force de l'arc), le fonctionnement de l'équipement est relativement simple.