

7 Soudures



7.1 Introduction

Les moyens d'assemblage tels que les soudures ou les boulons permettent de relier entre elles les pièces élémentaires, de formes diverses, constituant une charpente métallique. Les assemblages soudés (fig. 7.1) représentent ainsi une composante essentielle de toute structure et méritent de ce fait une attention particulière.

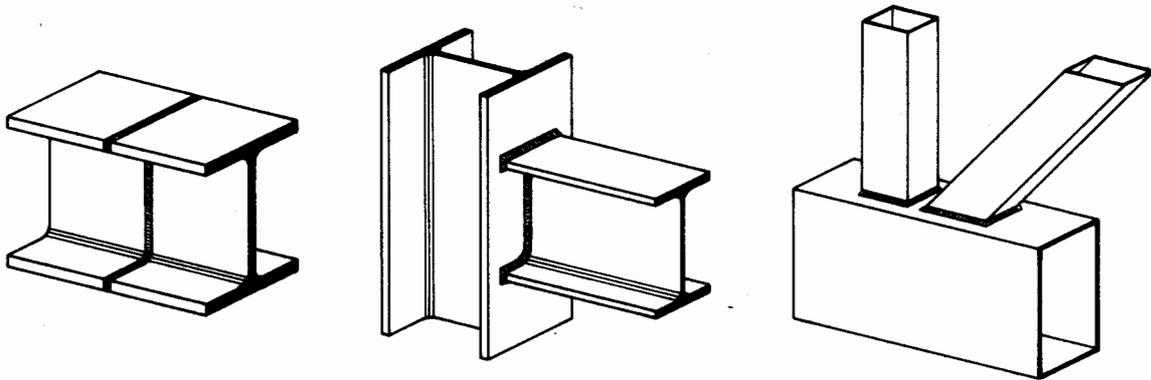


Fig. 7.1 Exemples d'assemblages soudés.

De plus, la connaissance des caractéristiques des moyens d'assemblage est indispensable pour choisir le type le mieux adapté à une structure, ainsi que pour imaginer des liaisons simples, facilement réalisables, et par conséquent économiques. Ce chapitre est, avec celui relatif aux boulons (chap. 8), un des chapitres fondamentaux de ce volume. Il sert également de base au chapitre 9 consacré aux assemblages.

Pour clarifier quelques notions souvent employées dans ce chapitre, il nous semble utile de définir les termes suivants :

- **Soudage.** Opération qui consiste à réaliser un joint soudé destiné à relier entre elles deux ou plusieurs parties d'un assemblage en assurant, par fusion, la continuité de la matière entre ces parties.
- **Joint soudé.** Ensemble de l'élément de liaison entre les pièces assemblées constitué par la soudure et les zones influencées thermiquement du métal de base.
- **Soudure.** Partie du joint soudé constituée par le métal d'apport fondu.
- **Anomalie.** Imperfection interne ou externe d'un joint soudé.
- **Défaut.** Anomalie ou groupe d'anomalies dont la taille et/ou le nombre dépassent une valeur limite normalisée.

Le but de ce chapitre est de traiter de la conception et de la résistance des joints soudés utilisés pour réaliser des assemblages soudés dans les charpentes métalliques. Les points suivants sont abordés dans ce chapitre :

- Section 7.2. Rappel des principes de dimensionnement applicables aux joints soudés.

- Section 7.3. Revue de divers procédés de soudage, de différents types de soudure et des anomalies internes inhérentes à toute soudure. Les contrôles de qualité à effectuer pour vérifier la bonne exécution des soudures ainsi que les dispositions pratiques de construction à respecter sont également abordés.
- Section 7.4. Définition de la résistance des soudures complètement pénétrées ou en cordon d'angle.

7.2 Principes de dimensionnement

7.2.1 Sécurité structurale

La vérification de la sécurité structurale des joints soudés se fait en appliquant le principe de base exprimé par (2.13) :

$$S_d \leq \frac{R}{\gamma_R} \quad (7.1)$$

- S_d : valeur de dimensionnement de l'effort sollicitant la soudure
 R : résistance ultime de la soudure
 γ_R : facteur de résistance

Dans (7.1), l'effort S sollicitant la soudure peut être exprimé par une force ou éventuellement par une contrainte. L'essentiel est qu'il soit déterminé sur la base d'une transmission d'effort correspondant au comportement physique de l'assemblage (chap. 9).

La résistance du joint soudé est en général définie pour un cas de sollicitations statiques. Il est cependant important de savoir que des phénomènes liés à la fatigue ou à la rupture fragile peuvent dans certaines conditions grandement influencer la résistance (§ 7.2.2 et 7.2.3).

Il faut encore préciser que la résistance ultime des assemblages, qu'ils soient soudés ou boulonnés, est établie de façon à ce que toute ruine prématurée dans les assemblages soit exclue (§ 2.6.3). La résistance ultime d'un joint soudé, donnée dans ce chapitre (sect. 7.4), contient donc une réserve (en l'occurrence le facteur γ_M introduit dans (2.33)) permettant de satisfaire cette exigence.

7.2.2 Résistance à la fatigue

Dans les constructions soudées soumises à des charges variables répétées, des fissures de fatigue peuvent se développer. Ces fissures prennent naissance au droit des anomalies, souvent au raccordement des soudures, et elles se propagent sous l'action des sollicitations répétées. Ce phénomène dépend essentiellement de la différence (ou étendue) de contrainte $\Delta\sigma$ appliquée, mais est également influencé par des facteurs tels que les concentrations de contraintes et les contraintes résiduelles. En outre, le danger existe qu'une fissure de fatigue devienne l'amorce d'une rupture fragile. On tiendra compte de ces phénomènes pour le dimensionnement de tous les ouvrages soumis à des charges répétées, notamment les ponts-routes, les ponts-rails et les voies de roulement de ponts roulants.

On se référera au chapitre 13 pour le développement des notions relatives à la résistance à la fatigue des assemblages soudés.

7.2.3 Rupture fragile

Quelques accidents survenus dans des constructions soudées ont mis en évidence l'influence sur la rupture fragile de la rigidité introduite dans les assemblages par le soudage. Plusieurs facteurs propices au développement d'une rupture fragile sont en outre réunis au voisinage d'un joint soudé, à savoir :

- la modification possible des propriétés métallurgiques et mécaniques de l'acier de base (chauffage et refroidissement lors du soudage);
- la présence d'anomalies, aux abords ou dans la soudure, qui constituent des amorces de fissures pouvant ensuite se propager par fatigue (chap. 13);
- les concentrations de contraintes au droit des soudures;
- l'augmentation des contraintes locales due aux contraintes résiduelles.

La rupture fragile est souvent associée uniquement à la notion de qualité d'acier (§ 3.3.1). Il y a cependant lieu de prêter une attention particulière au phénomène de la rupture fragile si l'on met en œuvre des aciers à haute résistance ou lorsque l'on prévoit des assemblages complexes comportant soit un grand nombre de joints soudés importants (contraintes résiduelles et éventuellement sollicitations tridimensionnelles), soit des épaisseurs importantes (déformation plastique empêchée par l'état tridimensionnel des contraintes). Ajoutons encore que le danger de rupture fragile est plus grand à basse température et lors d'une mise en charge soudaine (vitesse de chargement élevée).

7.2.4 Assurance de qualité

La qualité des soudures est à spécifier selon les exigences relatives à la structure; elle est ensuite à contrôler à l'aide des procédés décrits au paragraphe 7.3.5. La norme SIA 161/1 [7.1] définit les *classes de qualité* suivantes :

- QA (qualité spéciale),
- QB (qualité supérieure),
- QC (qualité normale),
- QD (qualité minimale).

Le choix de la classe de qualité est primordial aussi bien pour la sécurité de la structure que pour l'économie de la fabrication et du montage. L'ingénieur prêtera donc une attention particulière à ce choix, qui est dicté par les critères suivants :

- conséquences d'une rupture pour l'utilisateur ou l'environnement,
- degré de sollicitation du joint soudé,
- type du détail de construction,
- sensibilité du détail de construction à la fatigue ou à la rupture fragile,
- type de comportement (élastique ou plastique) de la section.

La classe de qualité d'une soudure aura une influence sur :

- les mesures à prendre lors de sa réalisation,
- le type et l'étendue des contrôles à effectuer,
- les tolérances à respecter concernant le nombre et la taille des anomalies externes (forme géométrique) ou internes (pores, fissures, ...),
- les coûts de fabrication.

Il est important de préciser que la classe de qualité normale QC est en général suffisante pour des constructions usuelles. L'ingénieur doit être conscient que le choix de classes de qualité supérieures a des incidences financières non négligeables, dues essentiellement au temps supplémentaire nécessaire pour le soudage et son contrôle. C'est ainsi qu'une soudure de classe de qualité QA pourra être entre 2.5 et 4.5 fois plus chère qu'une même soudure de classe de qualité QC selon qu'il s'agit d'une soudure automatique ou manuelle [7.1].

En Suisse, les détails de construction sont classés dans l'une ou l'autre des catégories suivantes :

- Catégorie S1. Elle se caractérise par un risque élevé pour les utilisateurs et l'environnement en cas de ruine d'un élément de construction. Elle peut correspondre à un élément de construction d'une épaisseur quelconque soumis à des actions statiques ou dynamiques, réalisés par des soudures de classes de qualité QA ou QB.
- Catégorie S2. Elle correspond à un faible risque, en cas de ruine, pour les utilisateurs et l'environnement, et se limite aux éléments de construction de faible épaisseur (max. 40 mm pour de l'acier Fe E 235 et 20 mm pour de l'acier Fe E 355), non soumis à de la fatigue ou à des chocs, et réalisés avec des soudures de classes de qualité QC ou QD.

Comme ces catégories correspondent à un détail de construction précis, il est possible qu'une structure métallique ait une partie de ses détails de construction qui soient classés S1, et une autre partie S2.

Pour garantir la qualité du soudage, l'entreprise réalisant ce travail doit être porteuse d'un certificat d'exploitation S1 (qui lui donne la possibilité de réaliser des soudures de classes de qualité QA à QD) ou S2 (pour la réalisation de soudures de classe de qualité QC et QD uniquement), attesté par une institution reconnue. Ces certificats d'exploitation, qui constituent l'homologation des entreprises, prescrivent le degré d'aptitude des installations et des équipements pour la fabrication d'éléments de construction de la catégorie correspondante, ainsi que la qualification du personnel dans le domaine de la production. Ils sont valables trois ans au plus, mais peuvent être renouvelés après une nouvelle inspection.

La norme européenne prEN 1090-1 [7.2] traite des questions d'homologation des modes de soudage et de la qualification des soudeurs.

7.3 Joints soudés

La soudure est le moyen d'assemblage le plus fréquemment utilisé pour la fabrication en atelier. Sur le chantier, son emploi est moins généralisé à cause des difficultés de mise en œuvre liées souvent à des conditions climatiques pas toujours favorables. Pour les charpentes courantes, on préfère l'emploi de boulons; néanmoins, pour des structures fortement sollicitées (ponts) ou pour des constructions particulières (réservoirs), la soudure est régulièrement employée, en Suisse, même sur le chantier.

Les principaux avantages qu'offre l'emploi de la soudure sont :

- la réalisation d'assemblages rigides, donc peu déformables,
- une diminution du temps de préparation des pièces de l'assemblage, par rapport au boulonnage, notamment dans le cas de soudures non pénétrées (pas de trous à percer, réduction du nombre de couvre-joints et de plaques de tête),
- une simplification des assemblages,
- une amélioration de l'apparence de la construction,
- la réalisation d'un assemblage étanche.

Elle nécessite par contre certaines précautions de mise en œuvre, notamment :

- le recours à un personnel qualifié,
- la protection des soudeurs sur le chantier vis-à-vis des intempéries,
- l'utilisation de procédés de contrôles de qualité sur le chantier.

7.3.1 Procédés de soudage

L'opération de soudage par fusion avec fil-électrode fusible consiste à réunir deux pièces par la dépose d'un cordon de métal fondu. Le métal d'apport, nécessaire à la réalisation du cordon de soudure, provient normalement de l'électrode; il doit posséder à l'état fondu une résistance au moins égale à celle du métal de base. Les divers procédés permettant de réaliser cette opération se différencient d'une part par la source de chaleur (flamme, arc électrique, ...) et d'autre part par le type de protection (laitier, flux, gaz, ...) du bain en fusion par rapport à l'air ambiant. On distingue également entre :

- le soudage automatique (la tête de soudage est montée soit sur un chariot dont l'avancement est automatique, soit sur un robot), qui s'applique surtout aux soudures continues d'une certaine longueur (joints de tôles, joints âme-aile d'une poutre composée à âme pleine ou d'un caisson, etc.);
- le soudage semi-automatique (avancement automatique de l'électrode avec une torche tenue à la main) qui est appliqué de manière générale;
- le soudage manuel à l'arc qui est souvent le seul moyen possible pour exécuter des soudures dont l'accès est difficile; il est généralement appliqué sur le chantier.

Nous rappelons au tableau 7.2 les procédés de soudage à l'arc employés fréquemment dans la construction métallique, avec leurs termes équivalents en allemand et en anglais [7.2]. Précisons que les procédés MIG, MAG et sous flux en poudre sont soit semi-automatiques, soit automatiques. Pour la description complète de ces diverses méthodes, on se référera à [7.3] ou à [7.4].

Tableau 7.2 Procédés de soudage à l'arc : équivalence des termes français, allemands et anglais.

Français	Allemand	Anglais
<ul style="list-style-type: none"> • Soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée • Soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec fil-électrode fusible (MIG) • Soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec fil-électrode fusible (MAG) • Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène (TIG) • Soudage à l'arc sous flux en poudre avec fil-électrode 	<ul style="list-style-type: none"> • Lichtbogenhandschweissen mit Schutzelektroden • Metall-Inertgasschweissen (MIG) • Metall-Aktivgasschweissen (MAG) • Wolfram-Inertgasschweissen (WIG) • Unterpulverschweissen mit Drahtelektroden 	<ul style="list-style-type: none"> • Metal arc welding with covered electrodes • Metal-arc inert gas welding (MIG-welding) • Metal-arc active gas welding (MAG-welding) • Tungsten inert-gas arc welding (TIG) • Submerged arc welding with wire electrode

En guise de compléments aux procédés de soudage à l'arc cités dans le tableau 7.2, nous mentionnerons également le soudage par résistance, employé notamment pour le soudage des goujons, ainsi que des procédés déjà plus particuliers, tels que le soudage au plasma et au micro-plasma, par ultrasons ou au laser. Des informations relatives à ces différents procédés de soudage peuvent également être obtenus dans [7.4].

7.3.2 Types de joints et symboles

Les combinaisons possibles entre les types de soudure et formes de joint sont montrées schématiquement au tableau 7.3. Cela illustre d'une part quelles sont les possibilités concrètes de réalisation d'un joint soudé, et permet d'autre part de classer les détails soudés selon la forme du joint ou selon le type de soudure.

Joint	Soudure		
	complètement pénétrée	à pénétration partielle	cordons d'angle
bout à bout			—
en T			
par recouvrement	—	—	

Tableau 7.3 Exécutions possibles pour différents types de soudure et formes de joint.

Classification selon la forme du joint

Selon la forme du joint, on distingue principalement (tab. 7.3) :

- les joints bout à bout (réalisés avec des soudures à pénétration complète ou partielle),
- les joints en T, ou en fers croisés (réalisés avec des soudures à pénétration complète ou partielle, ou bien avec des cordons d'angle),
- les joints par recouvrement (réalisés avec des cordons d'angle).

L'Eurocode 3 (§ 6.6.2) définit une classification légèrement différente : on y distingue en effet les soudures d'angle, en entaille, en bout, en bouchon et sur bords tombés. Pour chacun de ces types de soudure, des indications détaillées sont données quant à leur géométrie et aux caractéristiques à considérer pour le calcul de la résistance.

Classification selon le type de soudure

Selon les types de soudure, il est possible de distinguer (tab. 7.3) entre les soudures à pénétration complète, à pénétration partielle et les cordons d'angle.

Des exemples de soudures complètement pénétrées pour les joints bout à bout et les joints en T sont montrés à la figure 7.4. Ces soudures nécessitent une préparation du bord des pièces à assembler (chanfrein). Les formes que l'on donne à ces chanfreins dépendent de l'épaisseur des éléments à assembler, de la possibilité de souder des deux côtés de la pièce et de la nécessité de réduire la déformation angulaire (par exemple, soudure en V double à la place d'une soudure en V afin de répartir l'échauffement sur les deux faces de la pièce). Les dimensions données à la figure 7.4 sont des valeurs indicatives prescrites par la norme ISO 9692 [7.5] : elles peuvent en effet varier selon le procédé de soudage employé et les méthodes appliquées.

Pour le dessin des soudures [7.6], on utilise les représentations symboliques données à la figure 7.4, ainsi que les symboles du tableau 7.5.

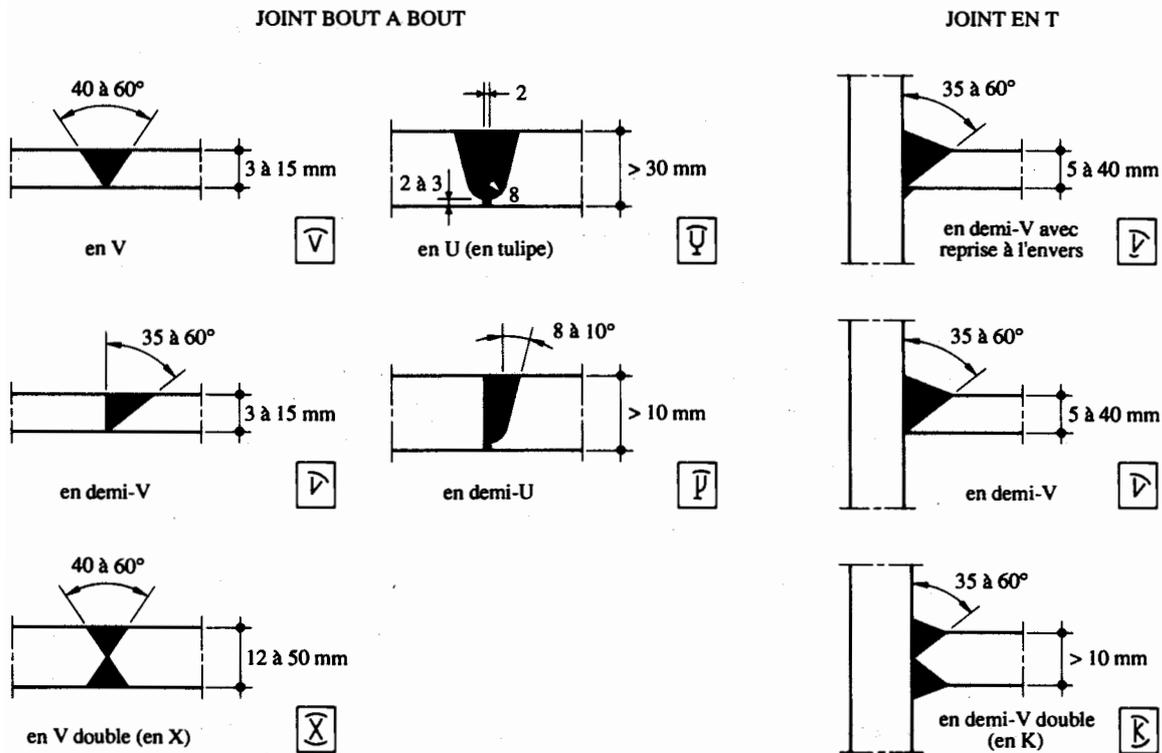


Fig. 7.4 Exemples de soudures complètement pénétrées avec leurs représentations symboliques.

Tableau 7.5 Symboles pour les soudures.

Symbole	Exemple
Soudure non meulée)	∠
Soudure meulée à ras)	∠φ
Reprise à l'envers)	∠(
Soudure au montage)	∠Y
Cordon d'angle)	a ∠
Double cordon d'angle)	a ∠
Cordon d'angle tout autour d'une pièce)	a ∠

Classification pour le dimensionnement

Pour le dimensionnement, on peut classer les trois différents types de soudure du tableau 7.3 en deux groupes :

- Le premier groupe comprend les soudures qui créent une pénétration complète de la section des pièces à assembler; il s'agit de soudures complètement pénétrées.

- Le second groupe correspond aux cordons d'angle, auxquels sont assimilées les soudures à pénétration partielle, car la section des pièces à assembler n'est que partiellement soudée.

7.3.3 Déformations et contraintes résiduelles

Le métal déposé et les zones des pièces adjacentes à la soudure sont portés à très haute température lors du soudage. Par la suite, cette masse réchauffée se refroidit et va par conséquent se contracter. Ce phénomène peut avoir les deux conséquences suivantes :

- si la contraction n'est pas empêchée par les éléments qui entourent la soudure et la masse réchauffée, il se produit essentiellement des déformations des pièces de l'assemblage (raccourcissements, déformations angulaires) (fig. 7.6(a));
- si la masse de matière froide autour de la soudure empêche cette dernière de se contracter (cas le plus fréquent), il se crée dans la soudure et les pièces assemblées un champ de contraintes internes auto-équilibrées que l'on nomme contraintes résiduelles de soudage (fig. 7.6(b)).

La pièce de la figure 7.6(b) est formée de deux tôles reliées par une soudure longitudinale. Lorsque le cordon de soudure se refroidit, il a tendance à se contracter. Comme les tôles adjacentes, restées dans leur ensemble froides, empêchent ce mouvement, il se crée parallèlement à la soudure un champ de contraintes longitudinales de traction dans la zone influencée thermiquement et son voisinage. Par réaction, les parties extérieures des tôles sont comprimées.

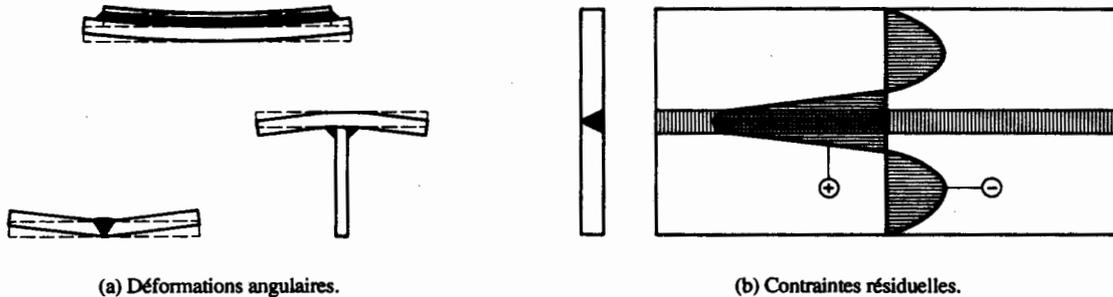


Fig. 7.6 Déformations angulaires et contraintes résiduelles longitudinales provenant du soudage.

La fabrication des éléments de structure soudés doit tenir compte des effets des apports locaux de chaleur. Par des séquences de soudage appropriées, il est possible de limiter les déformations des pièces. Quant aux contraintes résiduelles, on peut les réduire par un traitement thermique (recuit de détente, § 3.2.2). Cependant, cela est rarement possible pour des éléments de grandes dimensions ou pour des éléments soudés sur le chantier. On essaie toutefois de limiter les contraintes résiduelles à un niveau aussi bas que possible en contrôlant l'apport de chaleur par des séquences de soudages adéquates ou en exécutant des soudures de faible épaisseur. Il est même possible, par un choix judicieux des séquences de soudage, d'introduire des contraintes résiduelles de compression dans des parties de structure ultérieurement sollicitées en traction. Ceci peut atténuer l'influence négative des contraintes résiduelles lors de phénomènes de fatigue ou de rupture fragile.

Dans la mesure du possible, une concentration de soudures dans un assemblage est à éviter; cela peut en effet créer un état de contraintes tridimensionnel (contraintes résiduelles dans plusieurs directions) et réduire sa capacité de déformation (donc sa ductilité), ce qui augmente le danger de rupture fragile. Pour la même raison, on évitera des intersections de soudures en modifiant la conception de l'assemblage, par exemple en excentrant légèrement les éléments tubulaires à assembler (fig. 7.1).

7.3.4 Anomalies

Les principales anomalies qui peuvent être présentes dans les soudures sont représentées à la figure 7.7; d'autres types d'anomalies sont données dans [7.1]. On distingue celles relatives à une configuration externe ou interne de la soudure.

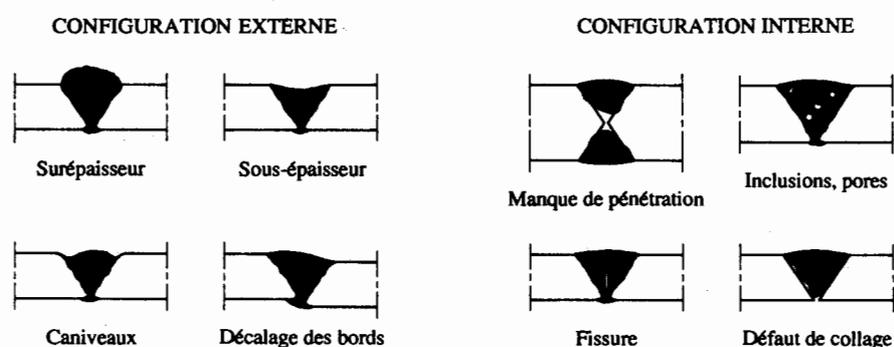


Fig. 7.7 Anomalies dans les soudures.

Du point de vue du comportement de l'assemblage vis-à-vis de la fatigue et de la rupture fragile, les anomalies les plus dangereuses sont, par ordre décroissant :

- les fissures,
- les défauts de collage,
- les défauts de pénétration,
- les inclusions,
- les porosités.

Les différents contrôles possibles pour détecter le nombre et la taille de ces anomalies sont présentés dans le paragraphe suivant.

7.3.5 Contrôle de qualité

Nous avons vu au paragraphe 7.2.4 que la classe de qualité d'une soudure définissait des exigences relatives au nombre et à la taille des anomalies. Le contrôle de qualité sert à garantir que les valeurs mesurées des anomalies ne dépassent pas les valeurs limites de la classe de qualité correspondante.

Il existe plusieurs procédés pour détecter les anomalies dans les soudures : la norme SIA 161/1 [7.1] décrit le type et l'étendue des différents examens à effectuer selon la classe de qualité de la soudure. Nous rappelons ici pour mémoire quels sont ces divers procédés; le détail de chaque type de procédure pourra être trouvé dans les références [7.3] et [7.7].

On peut classer les différentes méthodes de contrôle en deux catégories : les *contrôles destructifs*, qui s'appliquent essentiellement à des éprouvettes servant au contrôle des procédés de soudage, comprenant principalement :

- les macrographies,
- les micrographies,
- les essais de dureté,
- les essais de traction,
- les essais de pliage,
- les essais de résilience,

et les *contrôles non destructifs*, dont les plus courants sont ceux relevés dans le tableau 7.8 avec leurs termes équivalents en allemand et en anglais [7.1].

Tableau 7.8 Méthodes de contrôles non destructifs des soudures : équivalence des termes français, allemands et anglais.

Français	Allemand	Anglais
<ul style="list-style-type: none"> • Examen visuel • Examen par ressuage • Examen par magnétoscopie • Examen par radiographie • Examen par ultrasons 	<ul style="list-style-type: none"> • Sichtprüfung • Eindringprüfung • Magnetpulverprüfung • Durchstrahlungsprüfung • Ultraschallprüfung 	<ul style="list-style-type: none"> • Visual testing • Penetration testing • Magnetic particles testing • Radiation testing • Ultrasound testing

Les examens par ressuage et par magnétoscopie permettent de détecter uniquement les fissures superficielles ou celles débouchant en surface des joints soudés. Ces examens sont faciles à exécuter, ils ne demandent que très peu de matériel et sont relativement fiables.

Les examens par radiographie (rayons X) sont très utilisés pour révéler des anomalies volumiques, telles que les pores ou les inclusions de laitier à l'intérieur de la soudure; par contre, les fissures (surtout celles qui sont parallèles à la direction des rayons) sont très difficiles à détecter. L'examen par radiographie présente par contre l'avantage de fournir une pièce justificative du contrôle. Ses inconvénients sont qu'il n'est souvent pas possible de radiographier toutes les soudures, qu'il nécessite un appareillage lourd et qu'il représente un risque d'exposition aux rayonnements pour l'opérateur ainsi que pour les personnes présentes dans l'atelier ou sur le chantier.

Les examens par ultrasons permettent de localiser les anomalies telles que les fissures et les défauts de collage avec une bonne précision en grandeur et en direction; par contre, ce procédé nécessite un manipulateur très expérimenté du fait des multiples échos parasites que l'on peut observer sur l'écran et qui pourraient conduire à une interprétation erronée des résultats.

Il convient de rappeler que les contrôles non destructifs ont pour but de détecter les anomalies importantes dans les soudures. Si de telles anomalies existent, il faut comparer leur nombre et leur taille aux tolérances des normes et, suivant les cas, effectuer une correction de ces soudures. Il faut toutefois signaler que toute réparation doit être soigneusement contrôlée, car elle peut contenir des défauts encore plus dangereux que ceux que l'on cherche à éliminer. Il faut cependant être conscient qu'il reste en fait toujours des anomalies dans les joints soudés : d'une part celles qui sont tolérées et d'autre part celles qui ont échappé aux contrôles.

7.3.6 Dispositions pratiques de construction

Dimension de gorge

L'épaisseur a d'un cordon d'angle (fig. 7.9) est appelée *gorge* de la soudure. La notation a utilisée ici ne l'est pas de façon uniforme dans les différents pays; il faut donc prêter une attention particulière à cette notation, afin d'éviter des confusions dont les conséquences pourraient être parfois assez graves.

La valeur minimale a_{min} de la gorge d'un cordon d'angle transmettant un effort est fixée en fonction de l'épaisseur t_{max} de la plus grande des pièces à assembler, à savoir (fig. 7.9) :

- $a_{min} = 4$ mm pour $t_{max} \leq 17$ mm,
- $a_{min} = 5$ mm pour $t_{max} = 18$ à 25 mm,
- $a_{min} = 6$ mm pour $t_{max} \geq 26$ mm.

Une gorge de 4 mm constitue donc une valeur minimale dictée essentiellement par une question pratique de réalisation garantissant un apport suffisant de chaleur. Si l'épaisseur minimale d'une passe de soudure dans le domaine de la charpente métallique est de 4 mm, on peut cependant admettre à environ 6 mm l'épaisseur maximale réalisable en une seule passe. Il faudra donc réaliser plusieurs passes s'il est nécessaire de réaliser une soudure ayant une gorge supérieure à 6 mm. Dans le cas de soudures de grande longueur (liaison âme-aile d'une poutre composée à âme pleine, par exemple), on pourra réaliser, si la statique le permet, des cordons d'angle ayant une gorge inférieure à 4 mm.

L'Eurocode 3 (§ 6.6.5) prescrit une gorge minimale de 3 mm.

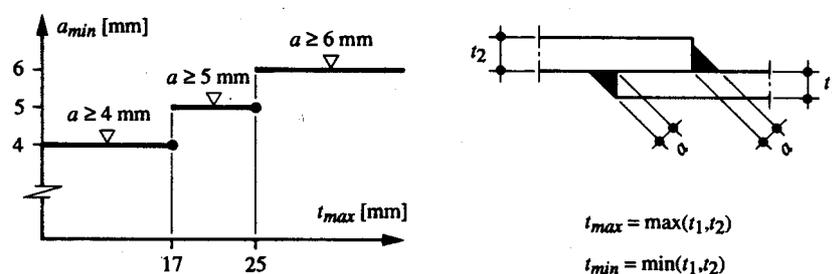


Fig. 7.9 Valeur minimale de la gorge d'un cordon d'angle en fonction de l'épaisseur des pièces assemblées.

Pour une question de géométrie, l'épaisseur maximale a_{max} de la gorge est limitée par l'épaisseur t_{min} de la plus mince des pièces à assembler (fig. 7.9) selon la relation :

$$a_{max} = 0.7 t_{min} \quad (7.2)$$

Dans le cas d'un cordon d'angle posé des deux côtés d'une tôle (fig. 7.10), la gorge a ne devrait pas dépasser la demi-épaisseur de cette tôle afin de ne pas la « brûler » totalement lors du soudage, mais surtout pour éviter que le joint soudé ne puisse plus être suffisamment plastifié :

$$a_{max} = 0.5 t \quad (7.3)$$

Il faut signaler qu'il existe pour cette forme de joint un danger d'arrachement lamellaire dans la tôle sollicitée à la traction, perpendiculairement à son épaisseur. Ce danger est d'autant plus prononcé que la tôle est épaisse et constituée d'un acier à haute résistance, car l'arrachement lamellaire peut dans ce cas déjà se produire lors du refroidissement de la soudure (à cause de contraintes résiduelles de traction perpendiculaires à la tôle). Il est donc préférable de choisir des soudures en demi-V double pour ce type de joint en T sollicité par des efforts importants de traction nécessitant des épaisseurs de tôles importantes.

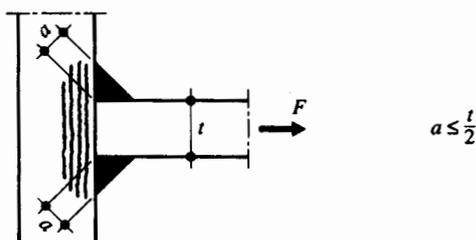


Fig. 7.10 Epaisseur maximale d'un cordon d'angle dans un joint en T.

Longueur des cordons d'angle

Les cordons d'angle doivent avoir une longueur totale ininterrompue d'au moins 40 mm si l'on veut en tenir compte pour une transmission de forces. Les cordons d'angle plus courts sont considérés comme soudures constructives (ou d'accostage) uniquement, sans transmission d'efforts.

La distribution des efforts le long d'un cordon d'angle sollicité au cisaillement est similaire à celle observée dans un assemblage boulonné. Les extrémités du cordon d'angle sont plus fortement sollicitées que sa partie médiane. Pour le dimensionnement, la norme SIA 161 admet cependant une distribution uniforme des efforts le long du cordon, quelle qu'en soit sa longueur. Dans le cas de cordons d'angle transmettant un effort de manière continue sur toute leur longueur, comme par exemple le flux de cisaillement à la jonction âme-aile d'une poutre composée à âme pleine, on admettra également que le cordon résiste uniformément sur toute sa longueur, sans limitation.

L'Eurocode 3 (§ 6.6.9) impose pour les joints par recouvrement une réduction de la résistance d'un cordon d'angle dont la longueur dans la direction de transmission de l'effort dépasse 150 a.

7.4 Résistance des joints soudés

7.4.1 Soudures complètement pénétrées

On peut en général admettre que la résistance du métal d'apport déposé lors du processus de soudage est supérieure ou égale à celle du matériau de base. Dans le cas du soudage d'éléments en acier Fe E 235 ou 355, le métal d'apport est un acier équivalent à de l'acier Fe E 355. De ce fait les soudures complètement pénétrées possèdent au minimum la même résistance ultime que les pièces qu'elles assemblent (cette hypothèse est cependant à vérifier dans le cas du soudage d'aciers à très haute résistance). Il n'est par conséquent pas nécessaire d'effectuer un calcul de dimensionnement de ces soudures.

On évitera d'utiliser un métal d'apport trop résistant pour les soudures, afin de ne pas diminuer la capacité de déformation des assemblages dans la zone de la soudure.

7.4.2 Cordons d'angle

Lors du dimensionnement d'un cordon d'angle, on doit vérifier que les forces puissent être transmises d'une pièce à l'autre à travers la soudure; elles doivent donc passer par les sections suivantes (fig. 7.11) :

- la **section de gorge** $A_w = a l$, qui est soumise à un effort de traction, et
- les **sections de contact** $A_s = s l$, sollicitées par des efforts de traction ou de cisaillement.

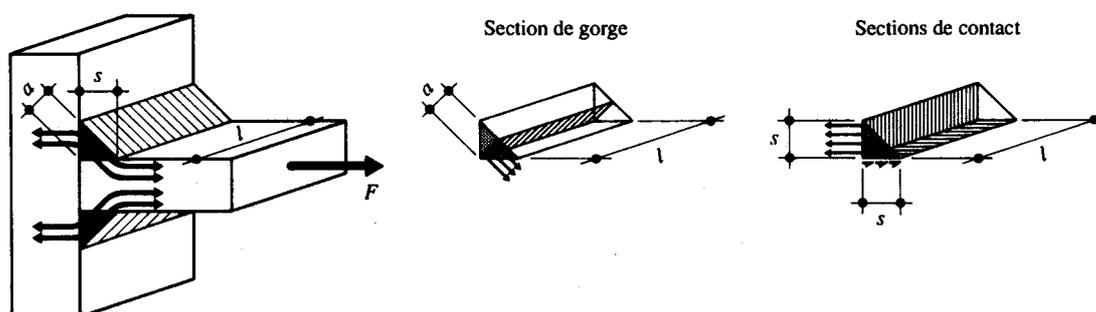


Fig. 7.11 Transmission d'un effort à travers un cordon d'angle.

Le dimensionnement d'un cordon d'angle consiste à définir à la fois sa longueur l et son épaisseur a (gorge). Il se fait avec la résistance ultime des cordons d'angle donnée par les conditions suivantes (quelle que soit la direction des forces), valables respectivement pour les sections de gorge A_w et de contact A_s :

$$R_w = 0.5 f_{uE} a l \quad (7.4 a)$$

$$R_s = 0.7 f_y s l \quad (7.4 b)$$

- R_w : résistance ultime de la section de gorge
- R_s : résistance ultime de la section de contact
- f_{uE} : résistance à la traction du métal d'apport (indice E pour électrode)
- f_y : limite d'élasticité de l'acier des pièces assemblées
- l : longueur du cordon d'angle considéré

La résistance ultime d'un cordon d'angle donnée par (7.4) a été établie à partir d'essais; elle contient déjà la réserve évoquée au paragraphe 7.2.1 (facteur γ_M), destinée à exclure une ruine prématurée dans les assemblages. Précisons également qu'on peut admettre, comme pour les soudures complètement pénétrées (§ 7.4.1), que les caractéristiques mécaniques de résistance du métal d'apport sont supérieures ou égales aux valeurs minimales du matériau de base. Dans le cas du soudage d'éléments en acier Fe E 235 ou Fe E 355, on fera alors l'hypothèse que le métal d'apport est un acier équivalent à de l'acier Fe E 355.

Les valeurs des sections de gorge A_w (qui correspond toujours à la section minimale de la soudure) et de contact A_s , admises pour le calcul, sont celles qui correspondent respectivement à la hauteur et au côté du triangle inscrit dans le cordon d'angle (fig. 7.12). Comme on admet en général que le triangle inscrit est isocèle, on a : $s = a \sqrt{2}$.

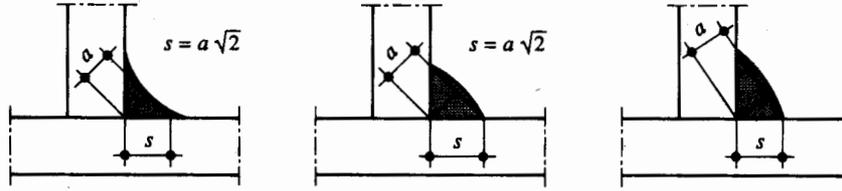


Fig. 7.12 Définition des sections de calcul des cordons d'angles.

Lorsque le cordon d'angle est exécuté par le procédé de soudage sous flux en poudre, on peut augmenter la valeur a de 2 mm au maximum, grâce à sa meilleure pénétration dans le métal de base (fig. 7.13(a)). Des essais préliminaires doivent cependant pouvoir apporter la preuve qu'une telle augmentation de pénétration peut effectivement être obtenue.

Les *soudures à pénétration partielle* (fig. 7.13(b)) sont à considérer comme des cordons d'angle qu'ils faut dimensionner comme tels. Leur résistance devra être déterminée en fonction de leur forme, car le triangle inscrit dans la soudure n'est pas forcément isocèle : il est alors nécessaire de tenir compte, selon la nuance d'acier des pièces assemblées, des dimensions s_1 et s_2 des deux sections de contact (fig. 7.13).

L'Eurocode 3 (§ 6.6.6) donne davantage d'indications concernant les *soudures à pénétration partielle*, en distinguant notamment le cas des assemblages bout à bout de ceux en T.

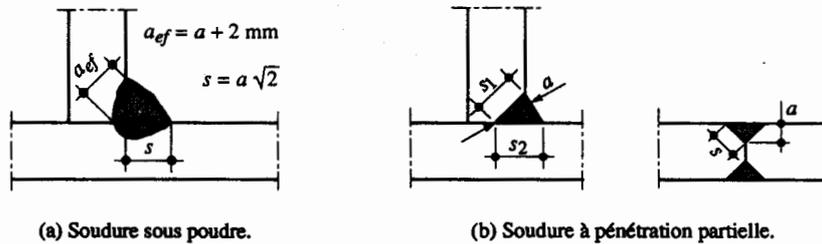


Fig. 7.13 Définition des sections de calcul des soudures sous poudre et à pénétration partielle.

Si l'on intègre la résistance ultime d'un cordon d'angle donnée par (7.4) au principe général de la vérification de la sécurité structurale (7.1), les cordons d'angle doivent satisfaire la condition suivante :

$$F_d \leq \frac{\min(R_w, R_s)}{\gamma_R} \quad (7.5)$$

F_d : valeur de dimensionnement de la force F à transmettre

Pour des sections de contact perpendiculaires ($s = a\sqrt{2}$) et pour un métal d'apport ayant une résistance à la traction $f_{uE} \geq 510 \text{ N/mm}^2$:

- la section de contact A_s est déterminante pour établir la résistance d'un joint soudé dont les pièces assemblées sont en acier Fe E 235,

- la section de gorge A_w est déterminante pour établir la résistance d'un joint soudé dont les pièces assemblées sont en acier Fe E 355.

Il est alors possible, compte tenu de ce fait, de visualiser la résistance d'un cordon d'angle en fonction de la nuance d'acier des pièces assemblées. Une telle représentation graphique est donnée à la figure 7.14 : elle permet de bien mettre en évidence l'influence de l'épaisseur de la gorge a et de la longueur l de la soudure sur sa résistance R . Les tables SZS C5 donnent ces mêmes schémas à une échelle permettant d'établir graphiquement les résistances données par (7.4). Le tableau 7.18 situé en annexe à ce chapitre indique, quant à lui, la résistance d'un cordon d'angle en kN par mm de longueur de cordon, en fonction de l'épaisseur a et de la nuance d'acier des pièces assemblées.

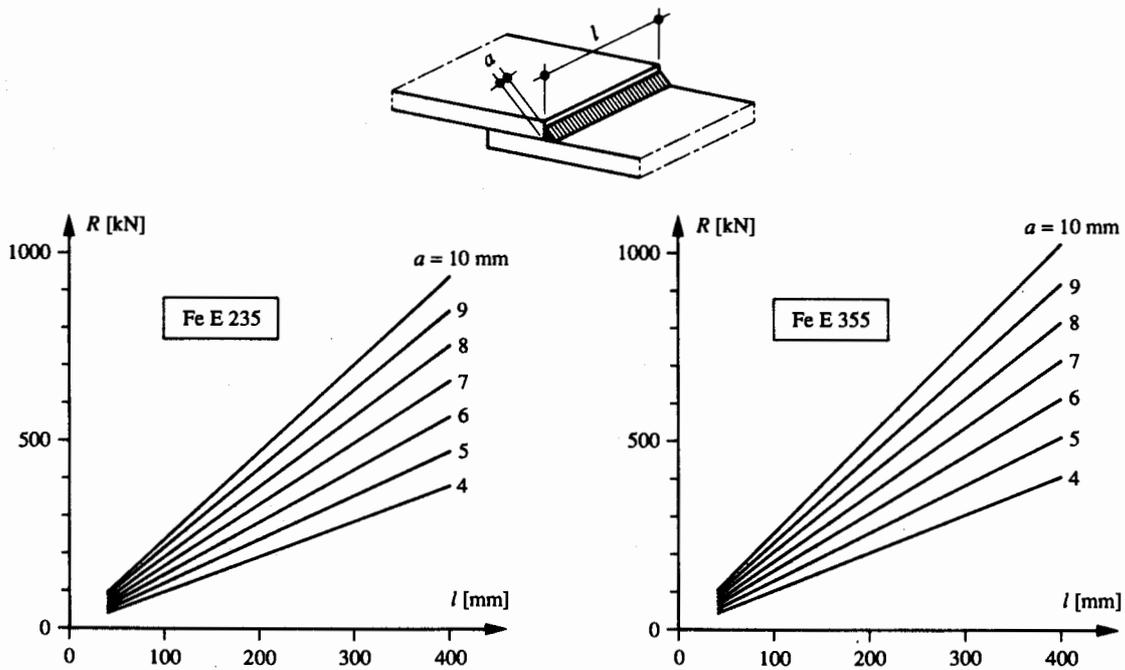


Fig. 7.14 Résistance ultime d'un cordon d'angle en fonction de sa longueur l et de sa section de gorge a pour des pièces assemblées en acier Fe E 235 et Fe E 355.

Il est important de bien déterminer la grandeur F de la force transmise par un cordon d'angle. Cette force sera donnée par un modèle de calcul de l'assemblage, qui est à établir de façon à approcher au mieux le comportement réel de l'assemblage tout en garantissant l'équilibre des efforts internes. Des précisions sur le cheminement des efforts et sur la modélisation des assemblages soudés sont données au chapitre 9, afin de fournir quelques éléments concrets nécessaires à l'application de (7.5).

L'Eurocode 3 (§ 6.6.5.3) définit la valeur de dimensionnement (de calcul) par unité de longueur $F_{w,Rd}$ de la résistance d'un cordon d'angle d'épaisseur a par la relation unique suivante :

$$F_{w,Rd} = \frac{1}{\gamma_{Mw}} \frac{f_u}{\sqrt{3}} \frac{1}{\beta_w} a$$

$F_{w,Rd}$: valeur de dimensionnement (de calcul) par unité de longueur de la résistance d'un cordon d'angle

γ_{Mw} : facteur de résistance pour les assemblages soudés ($\gamma_{Mw} = \gamma_{M2} = 1.25$)

f_u : résistance à la traction de la plus faible des parties assemblées

β_w : facteur de corrélation dépendant de la nuance d'acier des pièces assemblées ($\beta_w = 0.8$ pour de l'acier Fe E 235 et $\beta_w = 0.9$ pour de l'acier Fe E 355)

En comparant $F_{w,Rd}$ avec les «valeurs de dimensionnement» obtenues avec la norme SIA 161 (R_w/γ_R ou R_s/γ_R), on constate que cette dernière prescrit des valeurs de résistance supérieures d'environ 2 % à celles de l'Eurocode 3 lorsque la section de contact est déterminante, et inférieure d'environ 11 % lorsque c'est la section de gorge qui est déterminante.

Exemple 7.1 Cordon d'angle cisailé

Déterminer l'épaisseur a du cordon d'angle de l'assemblage de la figure 7.15, compte tenu du fait que sa résistance doit au moins atteindre la résistance des fers plats en acier Fe E 355.

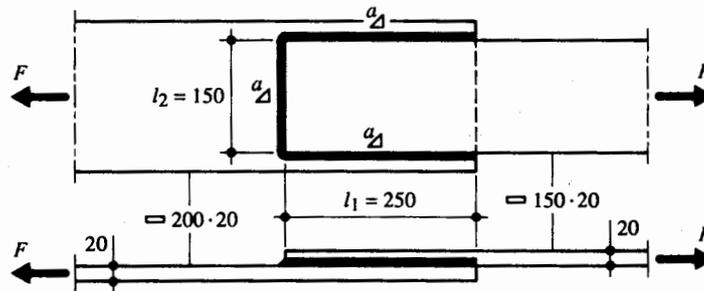


Fig. 7.15 Cordon d'angle cisailé.

La résistance du plus petit des fers plats vaut :

$$F_R = f_y A = 355 \text{ N/mm}^2 \cdot 150 \text{ mm} \cdot 20 \text{ mm} = 1065 \cdot 10^3 \text{ N} = 1065 \text{ kN}$$

Comme le fer plat supérieur est soudé sur trois côtés, la longueur du cordon d'angle vaut :

$$\Sigma l = 2 l_1 + l_2 = 2 \cdot 250 \text{ mm} + 150 \text{ mm} = 650 \text{ mm}$$

Quant à l'épaisseur du cordon d'angle, elle doit à la fois respecter des dispositions de construction ainsi que le critère de résistance au cisaillement. Constructivement, on a, selon la figure 7.9 et (7.2) :

$$t_{max} = 20 \text{ mm d'où } a_{min} = 5 \text{ mm}$$

$$a_{max} = 0.7 t_{min} = 0.7 \cdot 20 \text{ mm} = 14 \text{ mm}$$

La résistance de la section de gorge, donnée par (7.4a), doit être supérieure ou égale à F_R :

$$R_w = 0.5 f_{uE} a \Sigma l \geq F_R \text{ d'où } a \geq \frac{F_R}{0.5 f_{uE} \Sigma l} = \frac{1065 \cdot 10^3 \text{ N}}{0.5 \cdot 510 \text{ N/mm}^2 \cdot 650 \text{ mm}} = 6.4 \text{ mm}$$

L'épaisseur nécessaire correspond donc à $a = 7 \text{ mm}$.

Etant donné que le fer plat est en Fe E 355, la vérification de la section de contact n'est pas déterminante. L'application numérique de (7.4b), avec $s = a\sqrt{2}$, permet de s'en convaincre :

$$R_s = 0.7 f_y s \Sigma l \geq F_R \text{ d'où } a \geq \frac{1065 \cdot 10^3 \text{ N}}{0.7 \cdot 355 \text{ N/mm}^2 \cdot 650 \text{ mm} \cdot \sqrt{2}} = 4.7 \text{ mm} < 6.4 \text{ mm}.$$

Exemple 7.2 Soudures sollicitées en traction

Calculer la valeur de dimensionnement de l'effort de traction F_d que peut transmettre l'assemblage en acier Fe E 355 de la figure 7.16, selon que l'on réalise l'un des trois types de soudure suivants :

- Cas 1. Soudure en demi-V double complètement pénétrée.
- Cas 2. Soudure en demi-V double à pénétration partielle.
- Cas 3. Cordon d'angle.

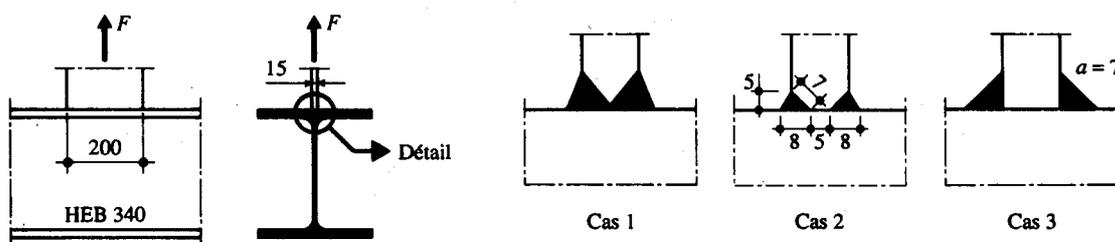


Fig. 7.16 Soudures sollicitées en traction.

- Fer plat

La résistance du fer plat vaut :

$$F_R = f_y A = 355 \text{ N/mm}^2 \cdot 200 \text{ mm} \cdot 15 \text{ mm} = 1065 \cdot 10^3 \text{ N} = 1065 \text{ kN}$$

La valeur de dimensionnement de l'effort de traction vaut alors, si on considère uniquement le fer plat :

$$F_d = \frac{F_R}{\gamma_R} = \frac{1065 \text{ kN}}{1.1} = 968 \text{ kN}$$

- Cas 1. Soudure en demi-V double complètement pénétrée :

Comme la soudure pénètre toute la section, la valeur de dimensionnement F_d de l'effort qui peut être repris est identique à la valeur obtenue avec le fer plat, à savoir (voir ci-dessus) :

$$F_d = 968 \text{ kN}$$

- Cas 2. Soudure en demi-V double à pénétration partielle :

On a ici $a = 7 \text{ mm}$ et, comme les pièces assemblées sont d'un acier de même nuance (en l'occurrence Fe E 355), $s = \min(7 \text{ mm}; 8 \text{ mm}) = 7 \text{ mm}$. Les résistances des sections de gorge et de contact valent donc respectivement :

$$R_w = 0.5 f_{uE} a l = 0.5 \cdot 510 \text{ N/mm}^2 \cdot 7 \text{ mm} \cdot (2 \cdot 200 \text{ mm}) = 714 \cdot 10^3 \text{ N} = 714 \text{ kN}$$

$$R_s = 0.7 f_y s l = 0.7 \cdot 355 \text{ N/mm}^2 \cdot 7 \text{ mm} \cdot (2 \cdot 200 \text{ mm}) = 497 \cdot 10^3 \text{ N} = 497 \text{ kN}$$

Comme $R_s < R_w$, c'est la section de contact qui est déterminante (contrairement à ce qui est valable pour un cordon d'angle assemblant des pièces en acier Fe E 355), d'où :

$$F_d = \frac{R_s}{\gamma_R} = \frac{497 \text{ kN}}{1.1} = 452 \text{ kN}$$

La résistance de la soudure est déterminante par rapport à celle du fer plat.

- Cas 3. Cordon d'angle :

Pour un cordon d'angle d'épaisseur $a = 7$ mm et de longueur $2 \cdot 200$ mm = 400 mm, la résistance est donnée par la section de gorge (7.4 a), étant donné que les pièces assemblées sont en acier Fe E 355 :

$$R_w = 0.5 f_{uE} a l = 0.5 \cdot 510 \text{ N/mm}^2 \cdot 7 \text{ mm} \cdot 400 \text{ mm} = 714 \cdot 10^3 \text{ N} = 714 \text{ kN}$$

La valeur de dimensionnement F_d de l'effort qui peut être repris par l'assemblage vaut alors :

$$F_d = \frac{R_w}{\gamma_R} = \frac{714 \text{ kN}}{1.1} = 649 \text{ kN}$$

La résistance du cordon d'angle est dans ce cas également déterminante par rapport à celle du fer plat.

7.4.3 Sollicitations composées

Les joints soudés peuvent être sollicités par des forces longitudinales F_x , normales F_z et transversales F_y (fig. 7.17). Des essais ont montré que, quelle que soit la direction de la force appliquée, la ruine de la soudure se produit toujours par cisaillement de la section de gorge ou de contact, et non pas par traction. Ces essais ont également montré que la résistance des soudures sollicitées transversalement était supérieure à celle des cordons sollicités longitudinalement.

La méthode de calcul exposée ici admet comme critère de ruine la résistance ultime de la soudure dans son sens longitudinal. Ce calcul étant conservateur, il est par conséquent applicable à tous les cordons d'angle sans distinction de la direction des forces qui les sollicitent. Lorsqu'un cordon d'angle est soumis à des forces F_x , F_y et F_z , la vérification de la sécurité structurale peut donc s'effectuer en considérant la résultante F obtenue par addition vectorielle de ces forces (fig. 7.17). Il faudra cependant être prudent dans le cas où la longueur l d'une soudure soumise à des sollicitations composée est élevée : l'hypothèse d'une redistribution des contraintes due à la plastification de la soudure n'est alors plus vérifiée, ce qui peut avoir pour conséquence une répartition non uniforme des sollicitations le long de la soudure; il est alors nécessaire de calculer la résultante de force par unité de longueur en tenant compte de la transmission effective des forces.

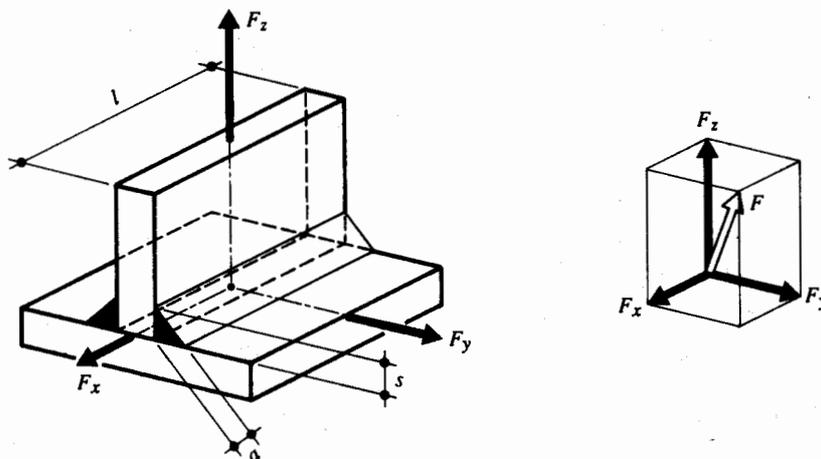


Fig. 7.17 Sollicitations composées dans un cordon d'angle.

7.5 Annexe

Cette annexe contient le tableau 7.18 dans lequel on a reporté la résistance ultime d'un cordon d'angle définie dans ce chapitre par (7.5) et (7.4). L'utilisation des valeurs qui y sont indiquées devrait fournir une aide au dimensionnement ou à la vérification des cordons d'angle, de façon similaire aux tables SZS C5, dans lesquelles les mêmes indications sont données sous forme d'abaque.

Tableau 7.18 Résistance ultime d'un cordon d'angle, en kN par mm de longueur de cordon [kN/mm].

Nuance d'acier des pièces assemblées	Résistance déterminante	Epaisseur a [mm] du cordon d'angle						
		4	5	6	7	8	9	10
Fe E 235	R_s	0.93	1.17	1.40	1.63	1.87	2.10	2.33
Fe E 355	R_w	1.02	1.28	1.53	1.79	2.04	2.30	2.55

Références

- [7.1] SIA 161/1, *Constructions métalliques / Assurance de la qualité, certificats d'exploitation, contrôles, matériaux*, SIA Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1990.
- [7.2] prEN 1090-1, *Exécution des structures en acier - Partie 1 : Règles générales et règles pour le bâtiment*, Comité européen de normalisation, Bruxelles, 1993.
- [7.3] STEINHAUER, M.E., *Laboratoire de matériaux / Métaux / Cahiers de laboratoire*, Laboratoire de métallurgie des soudures, EPFL, Lausanne, 1990.
- [7.4] PRATT, J.L., *Introduction to the Welding of Structural Steelwork*, The Steel Construction Institute, Ascot, 1989 (SCI Publication 014).
- [7.5] ISO 9692, *Soudage à l'arc avec électrode enrobée, soudage à l'arc sous protection gazeuse et soudage aux gaz / Préparation de joint sur acier*, ISO Organisation internationale de normalisation, Genève, 1992.
- [7.6] SZS B2, *Directives pour le dessin de construction métallique*, SZS Centre suisse de la construction métallique, Zurich, 1981.
- [7.7] HALMSHAW, R., *Introduction to the Non-Destructive Testing of Welded Joints*, The Welding Institute, Abington, 1988.