



ESDEP

GROUPE DE TRAVAIL 11

ASSEMBLAGES SOUS CHARGEMENT STATIQUE

Leçon 11.2.2

**Assemblages soudés :
Bases du calcul des soudures**



OBJECTIF

Présenter les méthodes générales de calcul de la résistance des soudures en bout et d'angle.

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
Leçon 11.2.1 :	Généralités sur les assemblages soudés

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 11.4 :	Analyse des assemblages

RESUME

Les bases du calcul de la résistance des soudures sont établies. Une partie importante de la leçon traite de la distribution réelle des contraintes et de la déformabilité des soudures d'angle et en bout. Quelques résultats expérimentaux sont présentés afin de mettre en évidence le bien-fondé des formules de calcul.

NOTATIONS

a	dimension de gorge de la soudure
F	force extérieure
$F_{\sigma\perp}$	force normale perpendiculaire à la section de gorge de la soudure
$F_{\tau\perp}$	force de cisaillement dans la section gorge et perpendiculaire à l'axe de la soudure
$F_{\tau//}$	force de cisaillement dans la section de gorge et parallèle à l'axe de la soudure
f_u	valeur nominale de la contrainte ultime de l'acier de base
f_{vw}	valeur de calcul de la limite d'élasticité en cisaillement de la soudure
L_j	longueur de l'assemblage à recouvrement
L_w	longueur de la soudure (dans un assemblage long)
l	longueur de la soudure
β_w	facteur de corrélation
β_{Lw}	facteur de réduction pour les soudures longues
γ_{Mw}	coefficient partiel de sécurité des soudures
σ_1	contrainte normale perpendiculaire à la section de gorge de la soudure
σ_2	contrainte normale parallèle à l'axe de la soudure
σ_{eq}	contrainte équivalente
τ_1	contrainte de cisaillement dans la section de gorge et perpendiculaire à l'axe de la soudure
τ_2	contrainte de cisaillement dans la section de gorge et parallèle à l'axe de la soudure

1. INTRODUCTION

Le but de cette leçon est de présenter les fondements du calcul de la résistance des soudures selon l'Eurocode 3 [1], de discuter les hypothèses sur lesquelles les méthodes sont fondées et d'examiner les méthodes générales utilisées pour déterminer les contraintes dans les soudures. En pratique, les procédures de calcul concernent principalement les soudures d'angle qui représentent environ 80 % des soudures réalisées dans le domaine des structures. Pour cette raison, la leçon aborde principalement le cas des soudures d'angle et accorde moins d'attention aux autres types de soudures (en bout, en entaille, en bouchon).

Pour le calcul des soudures, trois hypothèses fondamentales sont formulées [2] :

- Les soudures sont des éléments homogènes et isotropes ;
- Les pièces assemblées par soudure sont raides et leur déformabilité est par conséquent négligée ;
- Seules les contraintes nominales résultant des charges extérieures sont considérées. Les effets des contraintes résiduelles, des concentrations de contraintes et de la forme des soudures sont négligés au cours du calcul statique.

Ces hypothèses se traduisent par une distribution uniforme des contraintes dans la soudure, tandis qu'une variation des contraintes et des déformations est observée sur la longueur de la soudure. En fait, les concentrations de contraintes et les contraintes résiduelles peuvent conduire localement à l'atteinte de la limite d'élasticité. Mais la ductilité du matériau permet une redistribution des contraintes sur la longueur de la soudure, ce qui produit une réduction appréciable de la valeur des contraintes. Une redistribution apparaît aussi lorsque la soudure est soumise à l'action de charges extérieures.

Selon la théorie de la plasticité, la distribution finale des contraintes est optimale lorsque la limite d'élasticité est atteinte sur la longueur de la soudure.

L'Eurocode 3 [1] précise que le métal d'apport doit posséder des propriétés mécaniques (limite d'élasticité, limite ultime, élongation à la ruine et énergie minimale relevée au cours d'un essai Charpy) égales ou supérieures aux propriétés correspondantes du matériau de base. En conséquence, pour le calcul et le dimensionnement des soudures, la résistance du matériau de base est normalement considérée comme la résistance de référence.

Les soudures d'angle représentent le cas le plus important à traiter, mais les soudures en bout sont pourtant traitées en premier lieu, en raison de la simplicité de leurs exigences en matière de dimensionnement.

2. CALCUL DES SOUDURES EN BOUT

Si la procédure de soudage est correctement suivie, le métal d'apport des soudures en 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 en bout sont définies : soudures à pénétration complète ou partielle.

2.1 Soudures en bout à pénétration complète

Dans le cas d'une soudure en 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, voir [figure 1](#). On peut simplement considérer que la soudure en bout se substitue au matériau de base.

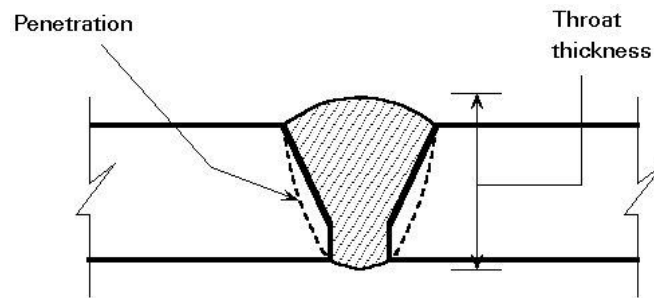


Figure 1 Butt weld with full penetration

2.2 Soudures en bout à pénétration partielle

Dans le cas d'une soudure en bout à pénétration partielle, la dimension de gorge à considérer est la profondeur de pénétration, légèrement réduite. Selon l'Eurocode 3 [1], 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, voir [figure 2](#). Si, par contre, des essais appropriés ont été réalisés, la dimension de gorge peut être choisie égale à la profondeur du chanfrein.

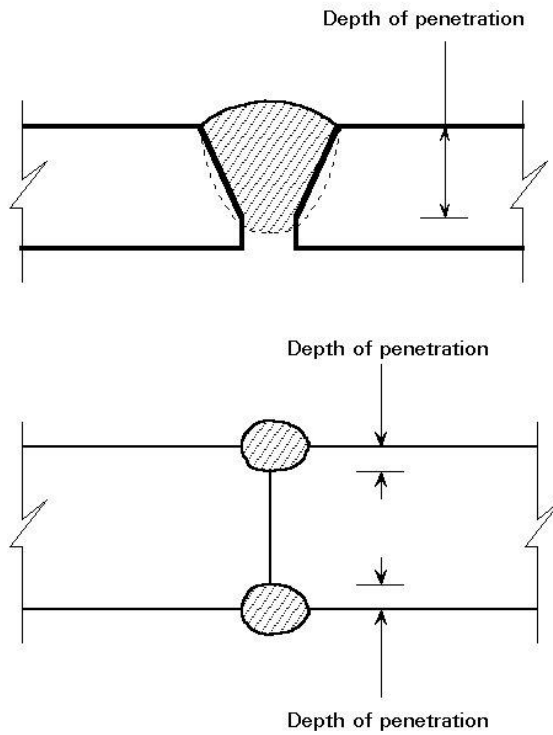


Figure 2 Butt welds with partial penetration

Un assemblage en T réalisé à l'aide d'une soudure en bout à pénétration partielle, à laquelle viennent se superposer des soudures d'angle, peut être considéré au même titre qu'une soudure en 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 (figure 3).

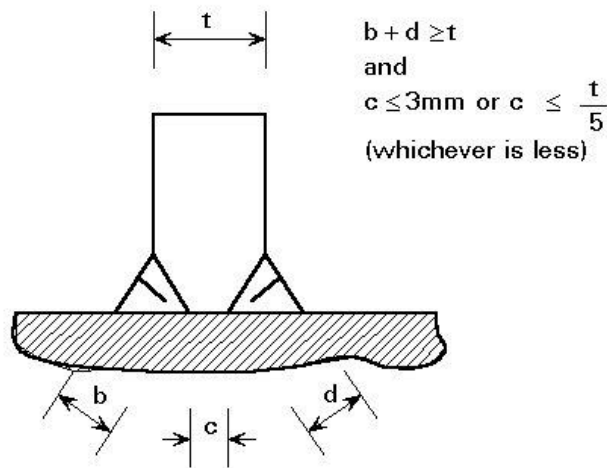


Figure 3 Partial penetration butt weld considered as a full penetration butt weld

2.3 Distribution de contraintes dans les soudures en bout

Comme mentionné précédemment, on suppose, lors du calcul des soudures, que la distribution des contraintes est uniforme sur la longueur des soudures. A l'état ultime, la redistribution plastique des contraintes rend cette hypothèse plus ou moins réaliste. Dans le domaine élastique, d'application pour le 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, à titre d'exemple, la barre de la [figure 4](#) 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 ([figure 4](#)) et dans laquelle la contrainte de traction au centre est supérieure à la contrainte moyenne.

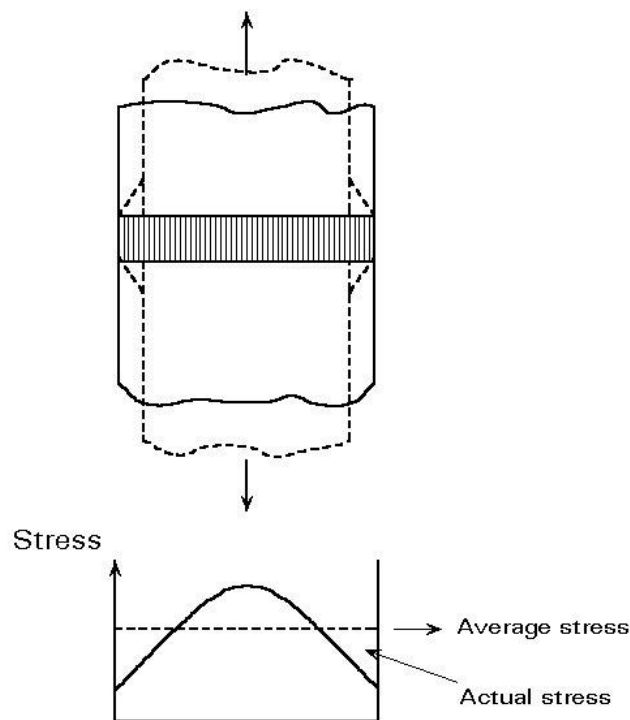


Figure 4 Stress distribution in a butt weld

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 d'une section à une autre est recommandée ([figure 5](#)). Ces aspects seront également discutés dans la leçon sur le dimensionnement à la fatigue et aux [leçons 3.5](#) et [3.6](#) relatives à la fabrication et au montage des structures en acier.

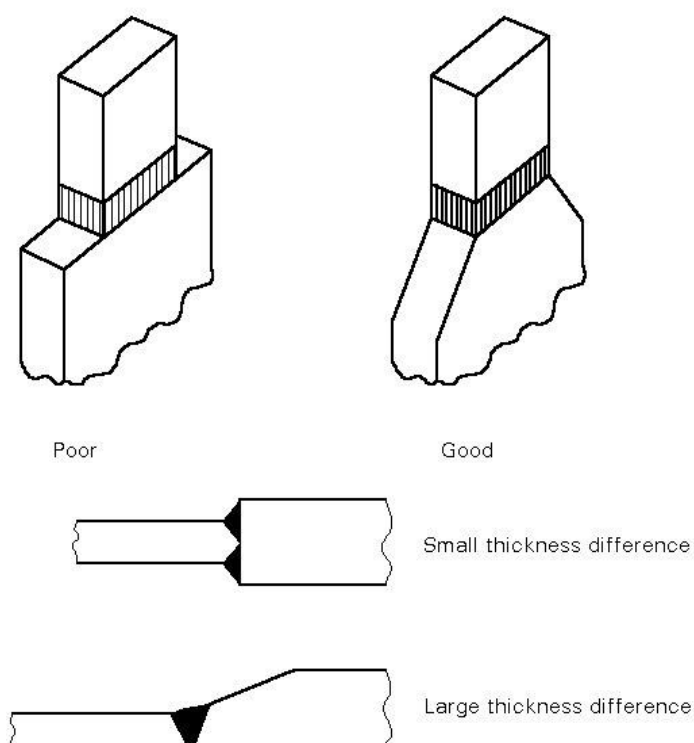


Figure 5 Transition in section reduces stress concentration

3. CALCUL DES SOUDURES D'ANGLE

3.1 Hypothèses

Les hypothèses adoptées pour le calcul des soudures d'angle selon l'Eurocode 3 [1] sont relatives aux caractéristiques mécaniques et géométriques. Comme mentionné auparavant, les propriétés mécaniques du métal d'apport doivent être compatibles avec celles du matériau de base. La section de gorge à considérer dans le calcul des cordons d'angle est définie à la [figure 6](#). L'aire de la section de gorge s'exprime comme le produit de la dimension de gorge et de 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.

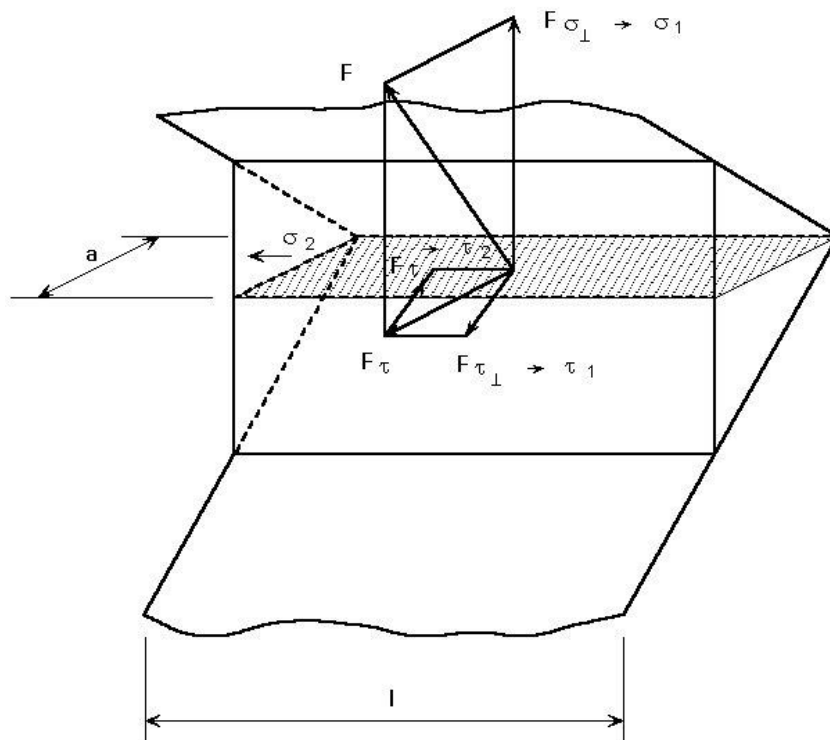


Figure 6 Stress components in a fillet weld

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

3.2 Méthode de base

La méthode de base pour le dimensionnement des soudures d'angle est décrite ci-dessous. Elle est exposée dans l'annexe m de l'Eurocode 3 [1] où elle est présentée comme une méthode alternative de dimensionnement.

La charge qui agit sur le cordon d'angle est décomposée en charges parallèles et perpendiculaires à l'axe longitudinal de la soudure ainsi que normales et transversales à la section de gorge (voir [figure 6](#)). Les contraintes correspondantes peuvent ainsi être calculées :

$$\sigma_1 = \frac{F_{\sigma_{\perp}}}{a l} \quad \text{est la contrainte normale perpendiculaire à la section de gorge}$$

$$\tau_1 = \frac{F_{\tau_{\perp}}}{a l} \quad \text{est la contrainte de cisaillement dans la section de gorge, perpendiculaire à l'axe de la soudure}$$

$\tau_2 = \frac{F_{\tau//}}{a l}$ est la contrainte de cisaillement dans la section de gorge,
parallèle à l'axe de la soudure

σ_2 est la contrainte normale parallèle à l'axe de la soudure.

La contrainte normale σ_2 n'est pas prise en considération car la section transversale de la soudure est très petite et a une résistance négligeable en comparaison de la résistance de la section de gorge soumise à la contrainte de cisaillement τ_2 .

L'application du critère de von Misès à ces diverses contraintes fournit la valeur de la contrainte équivalente σ_{eq} dans la section de gorge de la soudure :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3 \left(\tau_1^2 + \tau_2^2 \right)} \quad (1)$$

L'Eurocode 3, dans son Annexe m [1], spécifie que la soudure d'angle est adéquate si les conditions suivantes sont satisfaites :

$$\sigma_{eq} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} \quad (2)$$

et :

$$\sigma_1 \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}}$$

où : f_u est la valeur nominale de la contrainte ultime la plus faible des pièces assemblées

γ_{Mw} est le coefficient partiel de sécurité des soudures (= 1,25).

La valeur du facteur de corrélation β_w est choisie comme suit :

Nuance d'acier EN 10025	Contrainte ultime en traction f_u	Facteur de corrélation β_w
S235	360 MPa	0,8
S275	430 MPa	0,85
S355	510 MPa	0,9

Pour des valeurs intermédiaires de f_u , le facteur β_w s'obtient par interpolation linéaire.

3.3 Méthode de la contrainte moyenne

L'Eurocode 3 fournit, dans le texte principal, une formule 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.

Les soudures d'angle doivent satisfaire :

$$\frac{F}{al} \leq f_{vw} = \frac{f_u}{\sqrt{3}\beta_w\gamma_{Mw}} \quad (3)$$

où : F est la force extérieure appliquée à la soudure

f_{vw} est la résistance de calcul en cisaillement de la soudure.

3.4 Soudures longues

La [figure 7](#) 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 (voir [leçons 11.3](#)).

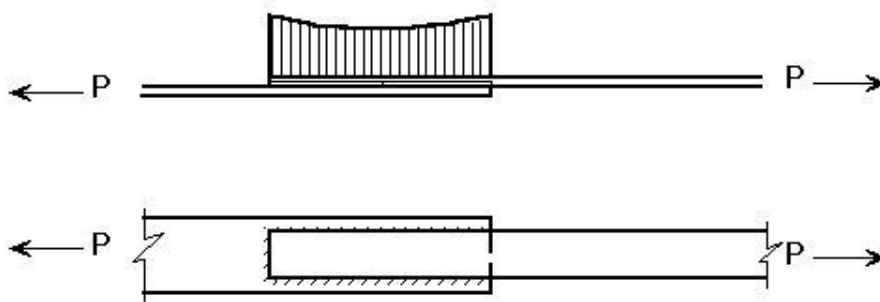


Figure 7 Stress distribution in long welds

Des contraintes importantes apparaissent aux extrémités de l'assemblage. A 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 multipliée par un facteur de réduction β_{Lw} qui traduit les effets de la distribution non uniforme des contraintes. Si l'assemblage à recouvrement est plus long que 150 a :

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

où : L_j est la longueur totale du recouvrement dans la direction d'application de l'effort.

Pour les cordons d'angle de longueur supérieure à 1,7 m utilisés pour la mise en place des raidisseurs transversaux dans les structures en plaques

$$\beta_{LW} = 1,1 - \frac{L_w}{17}$$

mais $0,6 \leq \beta_{LW} \leq 1,0$

où : L_w représente la longueur de la soudure (en mètres).

4. CALCUL DES SOUDURES EN ENTAILLE ET EN BOUCHON

La résistance des soudures en entaille et en bouchon est calculée par l'intermédiaire de la méthode de la contrainte moyenne exposée pour les soudures d'angle. 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.

5. CONCLUSION

- Les fondements du calcul de la résistance des soudures sont exposés.
- On y note que les contraintes résiduelles et les concentrations de contraintes sont négligées en raison de la redistribution importante des contraintes à l'état ultime. Pour les soudures longues dans les assemblages à recouvrement, une distribution non uniforme des contraintes est considérée.
- En règle générale, les soudures en bout ne requièrent aucun calcul spécifique. Un calcul n'est nécessaire que lorsque les soudures sont à pénétration partielle.
- A l'instar de l'Eurocode 3, une méthode dite de la contrainte moyenne ainsi qu'une méthode alternative (Annexe M) sont fournies pour le dimensionnement des cordons d'angle. La méthode de la contrainte moyenne ne nécessite pas la décomposition des efforts appliqués en composantes individuelles mais conduit généralement à des résultats plus sécuritaires.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Eurocode 3 : "Design of steel structures" : ENV 1993-1-1 : Part 1 : General rules and rules for buildings, CEN, 1992.
- [2] Bresler, B., Lim, T. Y., Scalzi, J. B., Design of steel structures, 2nd Edition, 1968.

7. LECTURES COMPLÉMENTAIRES

1. Owens, G. W. and Cheal, B. D., Structural Steelwork Connections, 1st Edition, 1989.
2. Bludgett, O.W., 'Design of Welded structures", James F Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, Ohio, USA, 1972.

Manuel de référence bien illustré, contenant de nombreuses informations et couvrant tous les aspects du dimensionnement des soudures et de la construction soudée.

TRADUCTION DES FIGURES

Pénétration

Épaisseur de gorge

[Figure 1](#) - Soudure en bout à pénétration complète

Profondeur de pénétration

[Figure 2](#) - Soudures en bout à pénétration partielle

(considérer la valeur la plus faible)

[Figure 3](#) - Soudure en bout à pénétration partielle considérée comme une soudure en bout à pénétration complète

Contrainte

Contrainte moyenne

Contrainte réelle

[Figure 4](#) - Distribution de contraintes dans une soudure en bout

Mauvais

Bon

Petite différence d'épaisseur

Grande différence d'épaisseur

[Figure 5](#) - La transition douce d'une section à une autre réduit les concentrations de contraintes

[Figure 6](#) - Composantes de contraintes dans une soudure d'angle

[Figure 7](#) - Distribution de contraintes dans les soudures longues