



ESDEP

GROUPE DE TRAVAIL 11

ASSEMBLAGES SOUS CHARGEMENT STATIQUE

Leçon 11.2.3

**Assemblages soudés :
Applications du calcul des soudures
d'angle**



OBJECTIF

Utiliser les méthodes de calcul exposées dans l'Eurocode 3 pour les soudures 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

LEÇONS CONNEXES

Leçon 2.4 :	Nuances et qualités des aciers
Leçon 2.6 :	La soudabilité des aciers de construction
Leçon 3.3 :	Principes du soudage
Leçon 3.4 :	Modes opératoires de soudage
Leçons 11.2.1 & 11.2.2 :	Autres leçons sur les assemblages soudés
Leçons 11.4 :	Analyse des assemblages

RESUME

Cette leçon illustre le calcul des soudures d'angle soumises à des charges selon des directions différentes. Une comparaison entre la méthode de la contrainte moyenne et la méthode alternative suggérée dans l'Eurocode 3 est effectuée.

NOTATIONS

A	section transversale de plat
a	épaisseur de gorge de la soudure
b	largeur de semelle
b_{eff}	largeur efficace
F	charge extérieure
f_y, f_p	valeur nominale de la limite d'élasticité du matériau de base
f_u	valeur nominale de la contrainte ultime du matériau de base
f_{vw}	résistance de calcul en cisaillement du métal de la soudure
l, l_2	longueur des cordons d'angle
r	rayon du congé de raccordement dans les profils laminés
t, t_p	épaisseur de plat
t_f	épaisseur de semelle
t_w	épaisseur d'âme
β_w	facteur de réduction
γ_{Mw}	coefficient partiel de sécurité des soudures
γ_{M2}	coefficient partiel de sécurité du matériau de base
σ_1	contrainte normale perpendiculaire à la section de gorge de la soudure
τ_1	contrainte de cisaillement dans la section de gorge, perpendiculaire à l'axe de la soudure
τ_2	contrainte de cisaillement dans la section de gorge, parallèle à l'axe de la soudure

1. INTRODUCTION

La [leçon 11.2.2](#) décrit les deux méthodes proposées dans l'Eurocode 3 [1] pour le calcul des soudures d'angle, la méthode de la contrainte moyenne et la méthode alternative.

La méthode de la contrainte moyenne (Eurocode 3 - § 6.6.5.3) est une simplification de la méthode alternative. Les soudures doivent satisfaire

$$\frac{F}{al} \leq f_{vw} = \frac{f_u}{\sqrt{3}\beta_w \gamma_{mw}} \quad (1)$$

- où :
- F est la force extérieure (quelle que soit sa direction) transmise aux soudures d'angle
 - a est le rayon de gorge
 - l est la longueur de la soudure
 - f_{vw} est la résistance de calcul de la soudure en cisaillement.

La méthode alternative (Eurocode 3, Annexe M) requiert le calcul de différentes composantes de contraintes qui sont ensuite utilisées pour déterminer une contrainte équivalente. Les conditions suivantes doivent être satisfaites :

$$\sqrt{\sigma_1^2 + 3(\tau_1^2 + \tau_2^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} \quad (2)$$

et :

$$\sigma_1 \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}} \quad (3)$$

- où : σ_1 , τ_1 et τ_2 sont les composantes de contraintes de traction et de cisaillement (voir [figure 1](#)) appliquées à la section de gorge de la soudure

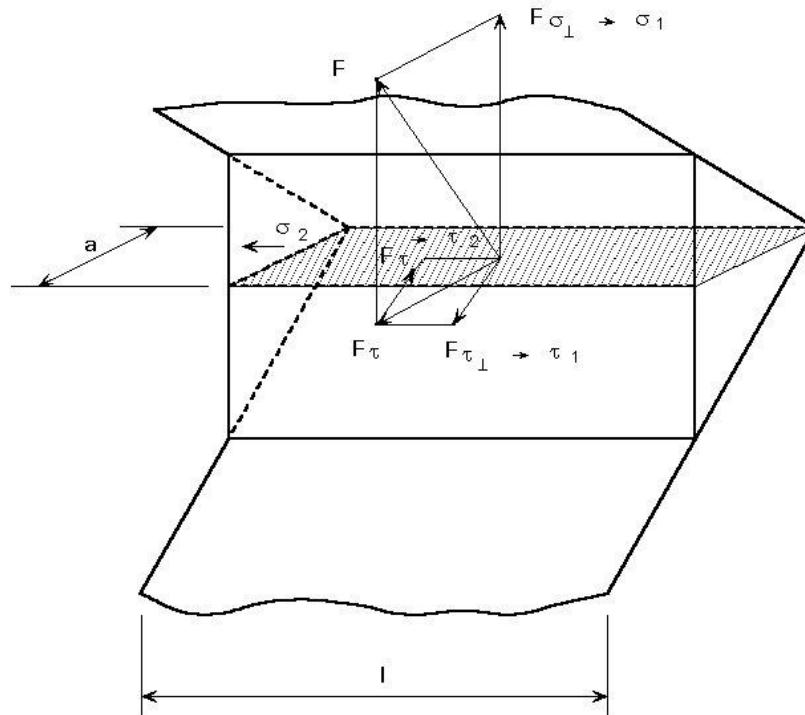


Figure 1 Load and stress components in a fillet weld

f_u est la valeur de la contrainte ultime en traction de la plus faible des pièces assemblées.

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

β_w est le facteur de corrélation dont les valeurs sont :

$\beta_w = 0,8$ pour l'acier S235 ($f_u = 360$ MPa)

$\beta_w = 0,85$ pour l'acier S275 ($f_u = 430$ MPa)

$\beta_w = 0,90$ pour l'acier S355 ($f_u = 510$ MPa)

Une comparaison des calculs découlant des deux méthodes est effectuée ci-après.

2. SOUDURES D'ANGLE LATÉRALES

Des soudures d'angle latérales transmettent un effort axial F appliqué dans la direction parallèle à l'axe de la soudure. Considérons un assemblage à recouvrement à deux soudures d'angle latérales ([figure 2](#)). Chaque soudure transmet un effort $F/2$.

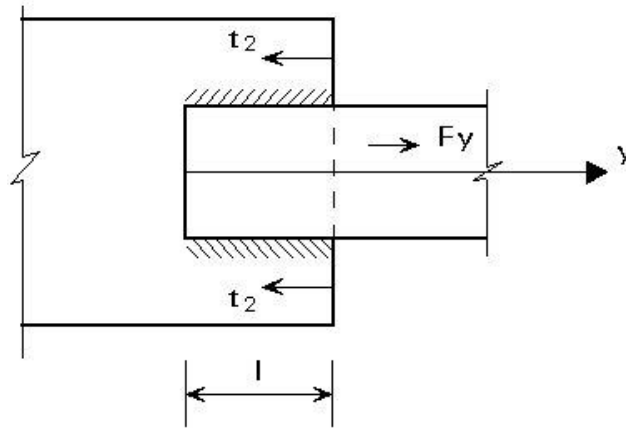


Figure 2 Side fillet welds

2.1 Application de la méthode de la contrainte moyenne

La condition (1) donne
$$\frac{F}{2 a l} \leq \frac{f_u}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{Mw}}$$

Par conséquent, la dimension de gorge doit satisfaire

$$a \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{F}{f_u \ell} \beta_w \gamma_{Mw} \quad (4)$$

2.2. Application de la méthode alternative

En raison du caractère axial de la charge, seule la composante τ_2 est considérée :

$$\tau_2 = \frac{F}{2 a l}$$

$$\sigma_1 = \tau_1 = 0$$

La condition (2) donne

$$\sqrt{3} \tau_2 = \frac{\sqrt{3} F}{2 a l} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}}$$

et la valeur minimale de la gorge est :

$$a \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{F_y}{f_u \ell} \beta_w \gamma_{Mw}$$

La condition (3) n'est pas prise en compte dans ce cas ($\sigma_1 = 0$). Pour les soudures latérales, les deux méthodes conduisent à des valeurs similaires de la dimension de gorge des soudures.

2.3 Résistance d'assemblage égale à la résistance des membrures assemblées

L'assemblage peut être dimensionné de manière à ce qu'il soit aussi résistant que les membrures assemblées. Dans ce cas, la détermination de l'effort appliqué à l'assemblage n'est pas nécessaire.

Si l'effort axial est transmis par deux soudures d'angle latérales, la condition suivante dite d'égale résistance peut être établie :

$$\frac{2 a \ell f_u}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{Mw}} \geq A f_y$$

ou :

$$a \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{A f_y}{\ell f_u} \beta_w \gamma_{Mw} \quad (5)$$

où : A est la section transversale de la membrure assemblée

f_y est la valeur nominale de la limite d'élasticité de la membrure.

3. SOUDURES D'ANGLE FRONTALES

Les soudures d'angles frontales transmettent un effort axial appliqué dans la direction perpendiculaire de l'axe de la soudure. Considérons un assemblage en T à deux soudures d'angle frontales ([figure 3](#)). Chaque soudure transmet une force $F/2$.

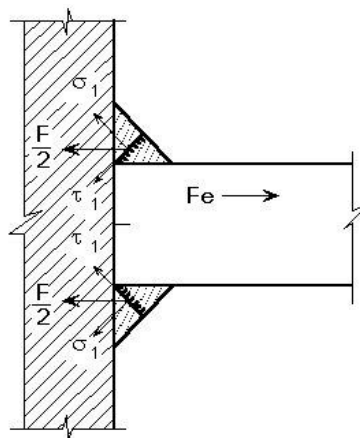


Figure 3 End fillet welds

3.1 Application de la méthode de la contrainte moyenne

La condition (1) s'exprime

$$\frac{F}{2 a l} \leq \frac{f_u}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{Mw}}$$

et :

$$a \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{F}{f_u \ell} \beta_w \gamma_{Mw} \quad (6)$$

3.2 Application de la méthode alternative

Seules les composantes de contraintes σ_1 et τ_1 sont définies dans la section de gorge de la soudure

$$\sigma_1 = \tau_1 = \frac{F}{2 \sqrt{2} a l}$$

$$\tau_2 = 0$$

De la condition (2)

$$\sqrt{\sigma_1^2 + 3 \tau_1^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}}$$

on déduit

$$\sqrt{\frac{F^2}{8 a^2 l^2} + \frac{3 F^2}{8 a^2 l^2}} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}}$$

La dimension de gorge minimale pour chaque soudure s'exprime :

$$a \geq \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{F}{f_u \ell} \beta_w \gamma_{Mw} \quad (7)$$

La condition (3) :

$$\sigma_1 = \frac{F}{2 \sqrt{2} a l} \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}}$$

permet d'obtenir :

$$a \geq \frac{F_x}{2 \sqrt{2} f_u \ell} \gamma_{Mw} \quad (7')$$

La comparaison de (7) et (7') indique que le choix de l'épaisseur de gorge est gouverné par la relation (7).

Pour les soudures frontales, la méthode alternative se montre donc plus avantageuse que la méthode de la contrainte moyenne. La réduction de l'épaisseur de gorge vaut :

$$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0,82$$

Des relations (7) et (4) peut ainsi se déduire la résistance équivalente d'une soudure d'angle frontale f_{cW} et d'une soudure d'angle latérale f_{sW} selon la méthode alternative. Ces valeurs, ainsi que la condition (8) sont fournies au tableau 1 pour différentes nuances d'acier.

Tableau 1 - Résistance équivalente des soudures d'angle frontales et latérales pour différentes nuances d'acier

	S235	S275	S355
f_{cW} [MPa] (soudures frontales)	255	286	321
Résistance égale avec deux soudures	$a \geq 0,46 t$	$a \geq 0,48 t$	$a \geq 0,55 t$
f_{sW} [MPa] (soudures latérales)	208	234	262

3.3 Résistance d'assemblage égale à la résistance des membrures assemblées

Lorsque deux soudures d'angle transmettent un effort agissant perpendiculairement à leur axe, la condition suivante d'égalité résistance est d'application (méthode alternative) :

$$\frac{2 a \ell f_u}{\sqrt{2} \beta_w \gamma_{Mw}} \geq t \ell f_y$$

ou :

$$a \geq \frac{\sqrt{2} t f_y}{2 f_u} \beta_w \gamma_{Mw} \quad (8)$$

où : t est l'épaisseur de la membrure assemblée.

4. CHARGEMENT OBLIQUE

Les deux types de chargement décrits aux § 2 et 3 se présentent fréquemment. Mais une soudure d'angle peut aussi être soumise à un chargement oblique. La [figure 4](#) illustre quelques situations dans lesquelles les soudures sont soumises à ce type de chargement.

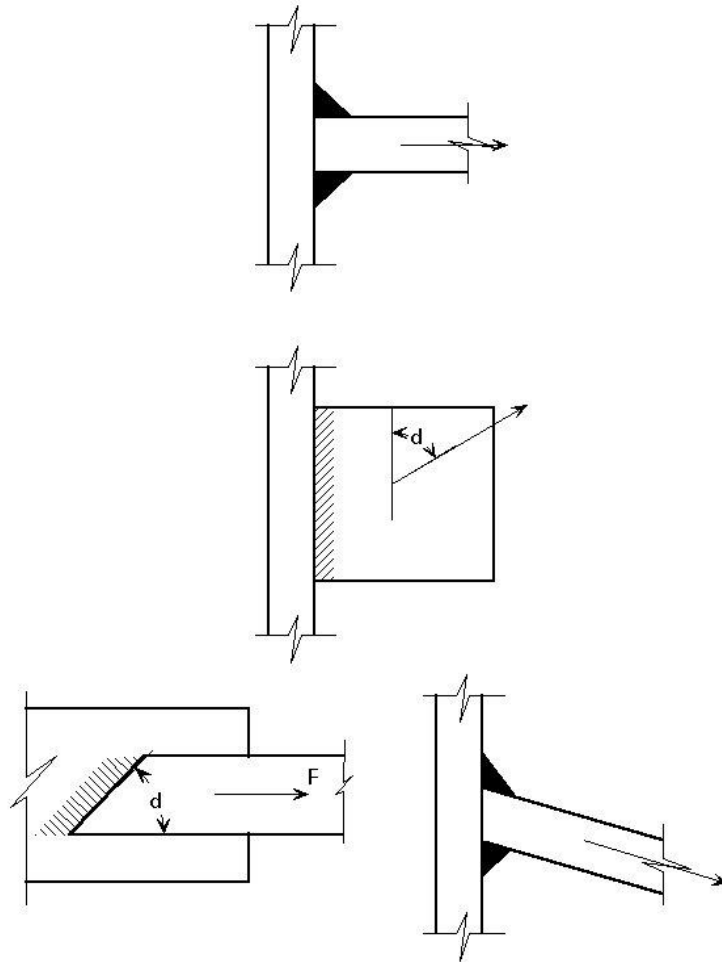


Figure 4 Oblique loaded welds

Si l'on se réfère à la méthode de la contrainte moyenne, le dimensionnement des soudures soumises à chargement oblique s'avère très aisée.

L'utilisation de la méthode alternative requiert par contre la procédure de dimensionnement suivante :

1. 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, voir [figure 1](#).
2. Les composantes de contraintes, σ_1 , τ_1 et τ_2 qui correspondent aux composantes de chargement sont évaluées.
3. Les valeurs des composantes de contraintes sont introduites dans la formule de base (2).

La [figure 5](#) met en évidence la relation entre la dimension de gorge minimale au sens de la méthode alternative et de la méthode de la contrainte moyenne pour un assemblage en T soumis à chargement oblique.

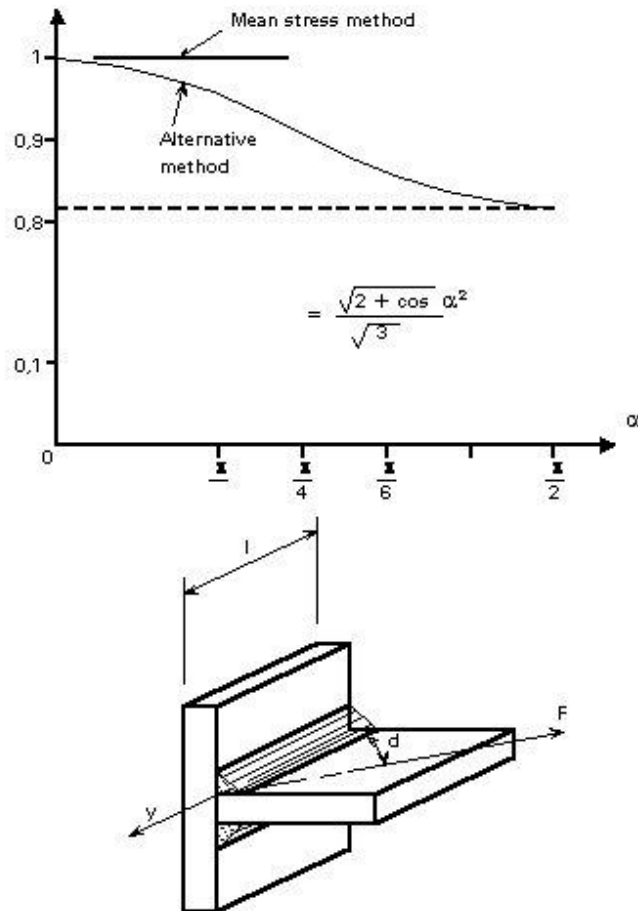


Figure 5 Oblique load applied in a Tee-joint

5. COMPORTEMENT CHARGE-DEFORMATION

Le comportement charge-déformation des soudures d'angle est illustré à la [figure 6](#). Il apparaît clairement qu'un cordon d'angle frontal est nettement plus résistant qu'un cordon d'angle latéral. En fait, la différence est encore beaucoup plus sensible que ce que les méthodes de calcul décrites dans cette leçon pourraient laisser penser. L'une des raisons à invoquer est la différence entre le plan de rupture réel dans un cordon d'angle frontal et la section de gorge théorique qui se traduit par une augmentation de l'aire de la section où la ruine se produit. Pour une soudure d'angle latérale, par contre, le plan de rupture est plus proche de la section de gorge.

La [figure 6](#) montre également que la ductilité d'une soudure chargée axialement est de loin supérieure à celle d'une soudure soumise à chargement transversal.

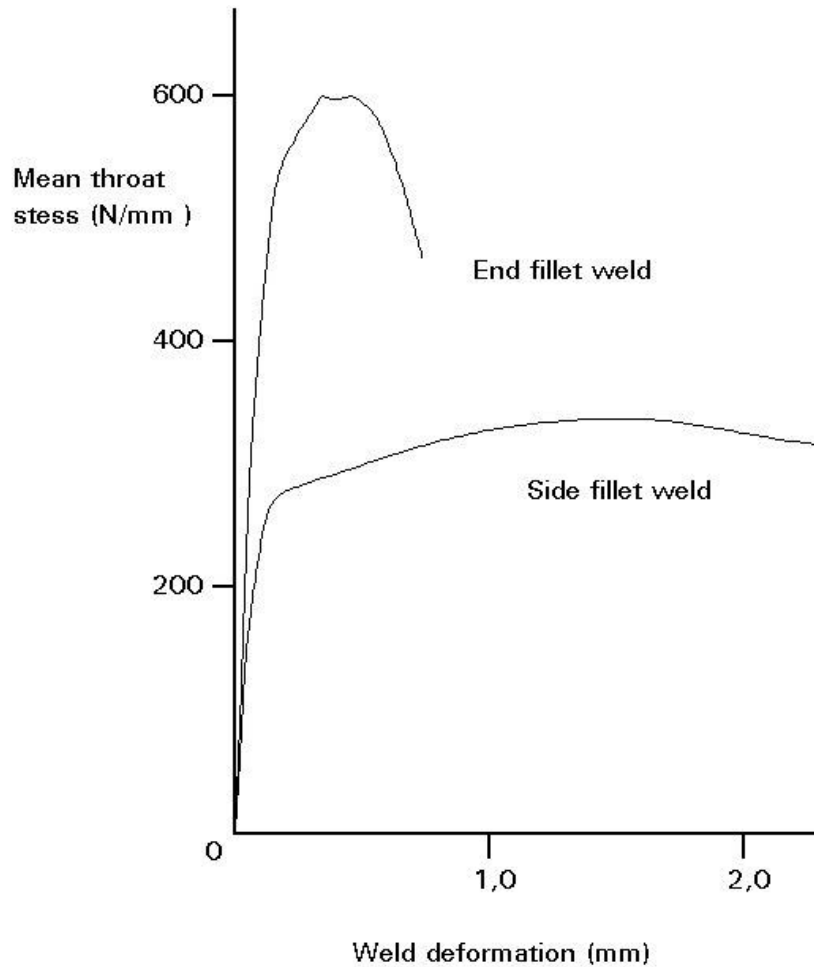


Figure 6 Load deformation behaviour of fillet welds

6. SOUDURES A DES SEMELLES NON RAIDIES

Lorsqu'un plat est soudé à la semelle non raidie d'un profilé en I ou tubulaire, le chargement tend à déformer la semelle ou la face du tube de manière non uniforme sur sa longueur. Il en résulte que les parties de la soudure situées à proximité de l'âme sont nettement plus sollicitées que les autres parties, voir [figure 7](#). Ceci impose la prise en compte d'une largeur efficace aussi bien pour le matériau de base que pour les soudures.

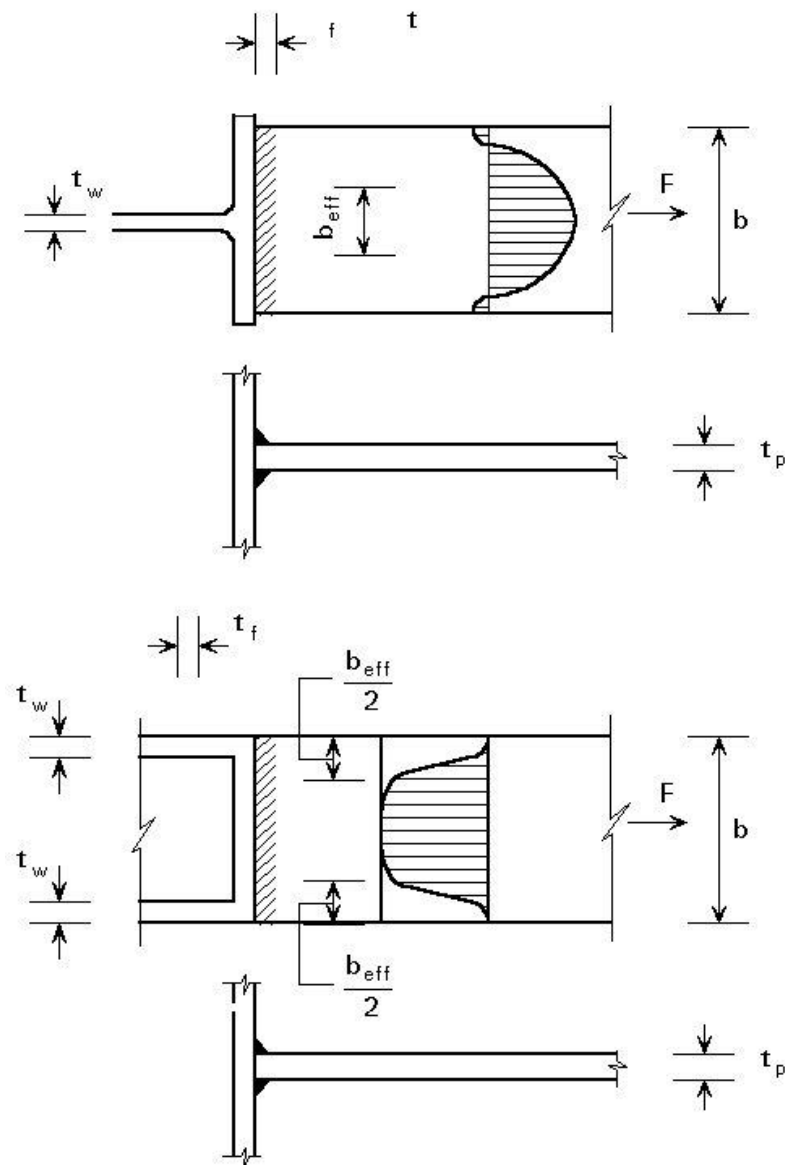


Figure 7 Effective breadth for unstiffened Tee-joint

Pour un profilé en I, la largeur efficace b_{eff} est prise égale à :

$$b_{eff} = t_w + 2 r + 7 t_f \quad (9)$$

mais :

$$b_{eff} = t_w + 2 r + 7 \frac{t_f^2}{t_p} \frac{f_y}{f_{yp}} \quad (10)$$

où les paramètres géométriques t_w , r , t_f et t_p sont indiqués à la [figure 7](#).

f_y est la valeur de calcul de la limite d'élasticité de la membrure

f_{yp} est la valeur de calcul de la limite d'élasticité du plat.

Si $b_{eff} < 0,7 b$, l'assemblage doit être raidi.

Pour un profilé tubulaire, la largeur efficace b_{eff} vaut :

$$b_{eff} = 2 t_w + 5 t_f \quad (11)$$

mais :

$$b_{eff} \leq 2 t_w + 5 \frac{t_f^2}{t_p} \frac{f_y}{f_{yp}} \quad (12)$$

7. VERIFICATION DU METAL DE BASE

Quelle que soit la méthode de calcul adoptée, il faut s'assurer de la résistance suffisante du métal de base des pièces assemblées. Lors de cette vérification, trois modes de ruine possibles doivent être considérés, voir [figure 8](#) :

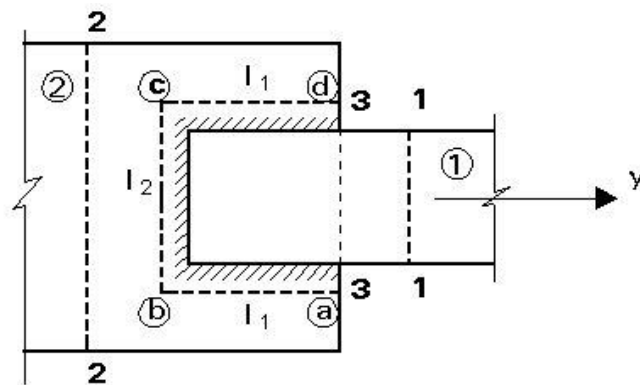


Figure 8 Failure lines in parent material

- Ruine en traction dans la membrure 1 (ligne 1 - 1)
- Ruine en traction dans la membrure 2 (ligne 2 - 2)
- Ruine dans la membrure 2, le long de la ligne 3 - 3, conjointement en traction (ligne b - c) et en cisaillement (lignes a - b et c - d). Dans ce cas, la résistance totale s'exprime comme la somme des résistances ultimes de chacune des lignes individuelles.

$$\left(\frac{2 l_1}{\sqrt{3}} + l_2 \right) \frac{t_2 f_{u2}}{\gamma_{M2}} \geq F \quad (13)$$

où : t_2 est l'épaisseur de la membrure 2

f_{u2} est la valeur de calcul de la contrainte ultime de la membrure 2

γ_{M2} est le coefficient partiel de sécurité à la ruine = 1,25.

Notons que la ruine en traction dans les membrures ne doit pas être à nouveau vérifiée lors du dimensionnement de l'assemblage. Le dimensionnement préalable des membrures permet de satisfaire les exigences correspondantes en matière de résistance.

8. CONCLUSION

- L'Eurocode 3 propose deux méthodes de dimensionnement des soudures d'angle. La méthode alternative contenue dans l'Annexe M est la plus économique mais implique une charge de calcul supplémentaire. Les étapes de calcul sont les suivantes :
 - détermination des composantes de chargement agissant dans la section de gorge des soudures d'angle,
 - calcul des composantes de contraintes correspondantes,
 - vérification à l'aide de la formule de base.
- Les soudures d'angle frontales sont plus résistantes que les soudures d'angle latérales mais possèdent une ductilité moindre.
- Aussi bien la méthode de base que la méthode alternative peuvent être utilisées pour les soudures soumises à chargement oblique.
- Dans le cas de connexions aux semelles non raidies de membrures, le transfert important et localisé de la charge dans les zones les plus raidies est couvert par l'utilisation d'une largeur efficace de soudure.
- La ruine possible en traction dans le métal de base des pièces assemblées doit toujours être vérifiée.

9. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Eurocode 3 : "Design of Steel Structures" : ENV 1993-1-1 : Part 1 : General rules and rules for buildings, CEN, 1992.

10. LECTURES COMPLÉMENTAIRES

- [1] Blodgett, O.W., "Design of welded structures", James F Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, Ohio, USA, 1972.
- [2] Owens, G.W. and Cheal, B.D., Structural Steelwork Connections, 1st Ed., 1989.

TRADUCTION DES FIGURES

[Figure 1](#) - Composantes de chargement et de contraintes dans un cordon d'angle

[Figure 2](#) - Cordons d'angle latéraux

[Figure 3](#) - Cordons d'angle frontaux

[Figure 4](#) - Soudures soumises à chargement oblique

Méthode de la contrainte moyenne

Méthode alternative

[Figure 5](#) - Chargement oblique appliqué à un assemblage en T

Contrainte moyenne dans la section de gorge (N/mm)

Cordon d'angle frontal

Cordon d'angle latéral

Déformation de la soudure (mm)

[Figure 6](#) - Comportement charge-déformation des soudures d'angle

[Figure 7](#) - Largeur efficace d'un assemblage en T non raidi

[Figure 8](#) - Lignes de rupture dans le matériau de base