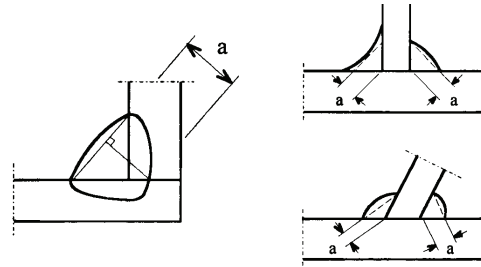


# Conception et calcul des assemblages soudés.

## 1 Terminologie :

### 1.1 Epaisseur utile (ou gorge) d'une soudure : a



### 1.2 Longueur utile : l



## 2 Dispositions constructives :

### 7.2 ASSEMBLAGES PAR SOUDURES BOUT A BOUT

7.2.1 Les croisements de cordons en T ou en croix sont admis, sous réserve de dispositions d'exécution réduisant les contraintes de retrait.

7.2.2 Dans le cas d'assemblages de pièces d'épaisseurs différentes, et si la pièce la moins épaisse est soumise à une contrainte de traction calculée supérieure à  $0,5 \sigma_e$ , la variation de section doit s'effectuer graduellement, avec une pente ne dépassant pas 1/3. Ce résultat est obtenu en donnant une forme convenable au dépôt de métal fondu et en débardant, si nécessaire, la pièce la plus épaisse.

Pour la détermination de la pente, la largeur de la soudure doit être prise en considération.

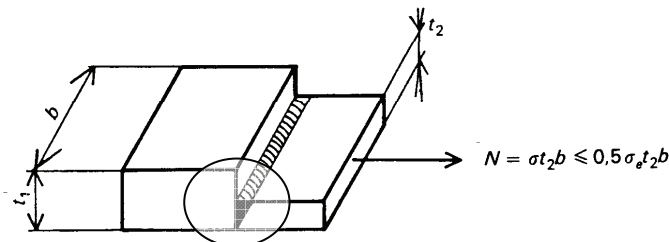
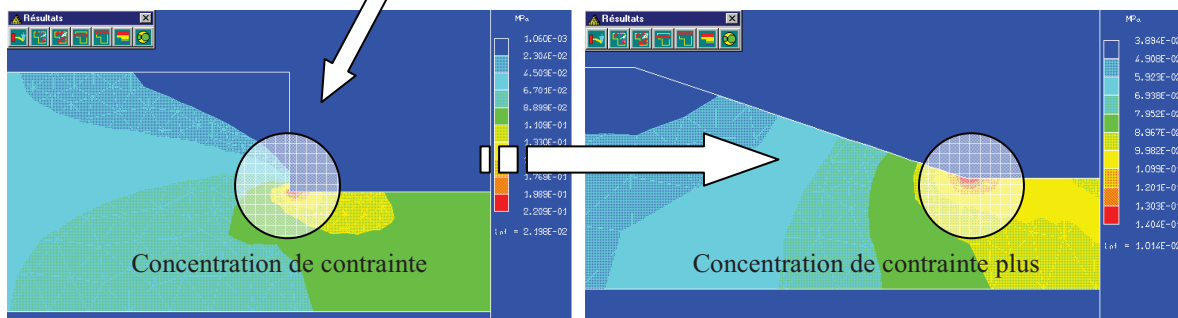
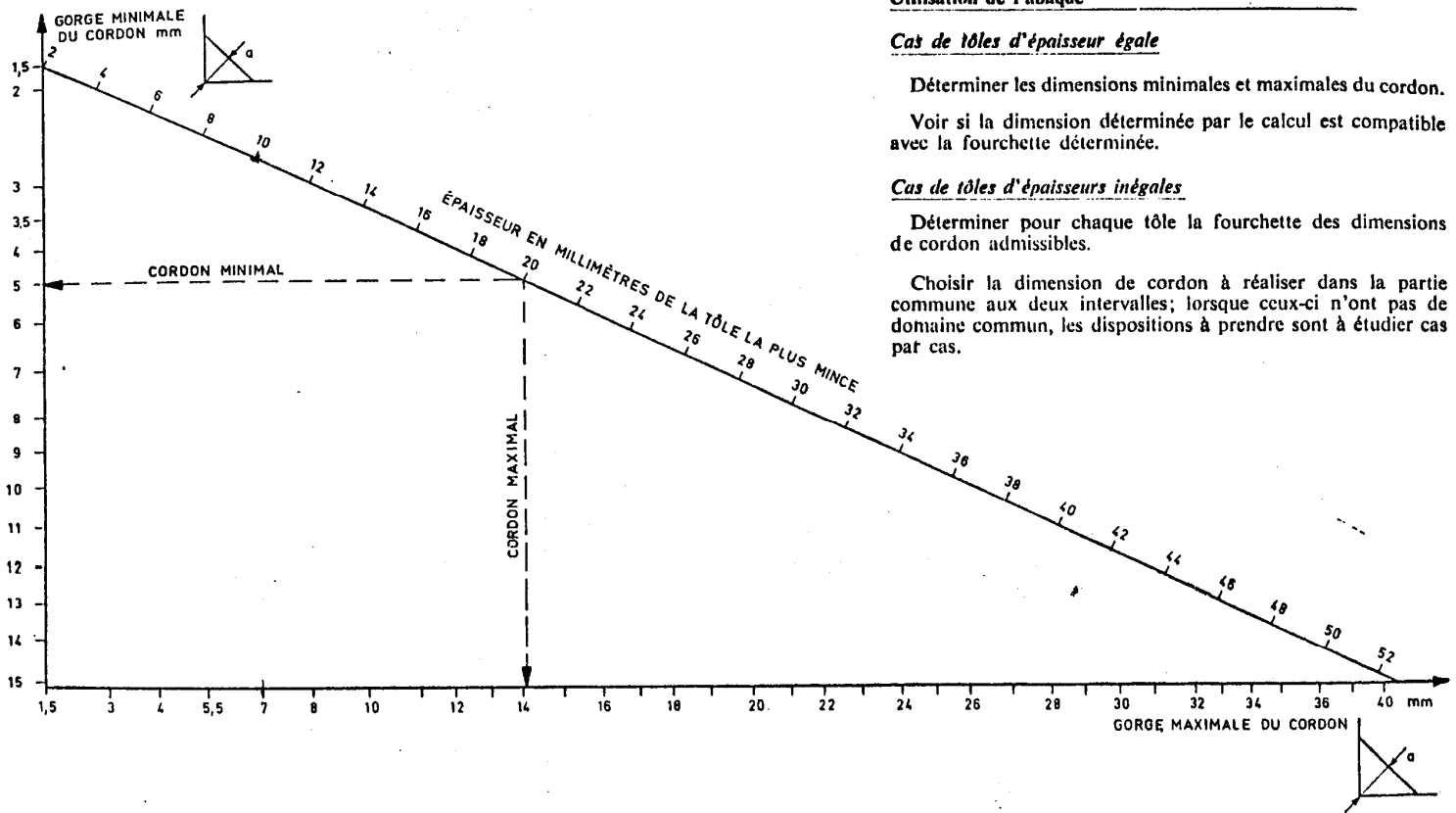


Figure 5



## 2.1 Prédimensionnement de la gorge d'une soudure d'angle : Steinberg-CTICM.



G. Steinberg - C.T.I.C.M.

### Utilisation de l'abaque

#### Cas de tôles d'épaisseur égale

Déterminer les dimensions minimales et maximales du cordon.

Voir si la dimension déterminée par le calcul est compatible avec la fourchette déterminée.

#### Cas de tôles d'épaisseurs inégales

Déterminer pour chaque tôle la fourchette des dimensions de cordon admissibles.

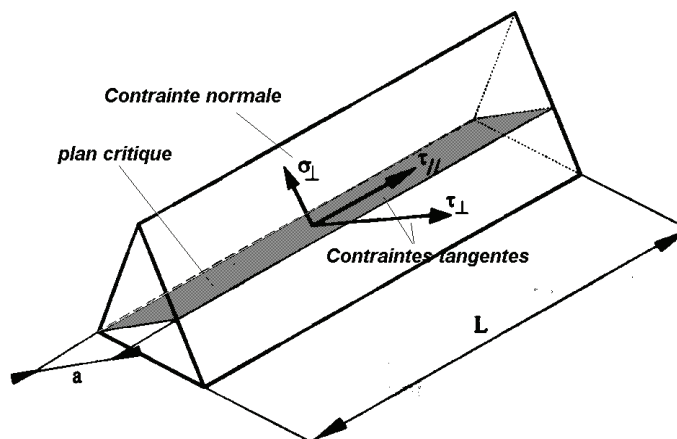
Choisir la dimension de cordon à réaliser dans la partie commune aux deux intervalles; lorsque ceux-ci n'ont pas de domaine commun, les dispositions à prendre sont à étudier cas par cas.

## 3 Vérification de la résistance des soudures : cas des soudures d'angle.

### 3.1 Etude de l'évolution de la contrainte dans un cas particulier : définition du plan critique

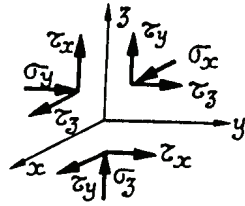
Au sein du cordon de soudure, pour un effort donné, la *contrainte maximale* se développe sur le plan d'aire minimale : **plan critique**.

Pour un cordon triangulaire, le **plan critique** est défini par la hauteur du triangle (*gorge*) et la longueur du cordon (*plan de gorge*) :



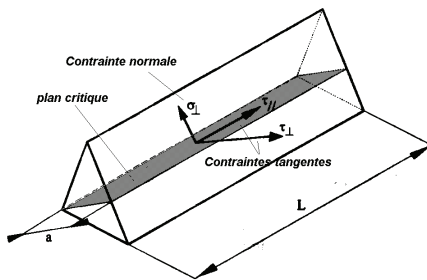
### 3.2 Rappel du critère de Von Mises :

Il a été défini que pour un état de contraintes, la matériau a un comportement élastique tant que :  $\sigma$



$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_y \sigma_z - \sigma_x \sigma_z - \sigma_y \sigma_x + 3\tau_{xy}^2 + 3\tau_{yz}^2 + 3\tau_{zx}^2 \leq f_e^2$$

Application du critère de Von Mises au cas d'un cordon de soudure :



### 3.3 Description normative de la résistance d'un cordon de soudure :

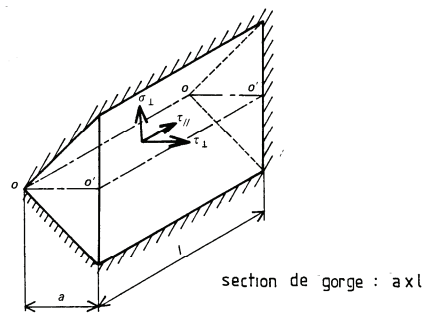


Figure 22

avec, quelle que soit l'épaisseur du produit.

$k = 0,7$  pour les nuances E 24, E 24W, TS E 24, TU E 24,

$k = 0,8$  pour les nuances E 26, TS E 26, TU E 26,

$k = 0,85$  pour les nuances E 30, E 375 D, E 335 D, TS E 30, TU E 30, TS E 30B,

$k = 1,0$  pour les nuances E 36, E 36W, E 355, E 355 D, E 375, E 390 D, E 420, E 430 D, E 445 D, E 460, E 490 D.

Dans le cas où l'assemblage est constitué d'aciers de nuances différentes, la limite d'élasticité à retenir pour l'application de la formule est celle de la nuance la plus faible.

Une annexe à la présente norme donne des applications de cette formule pour les principaux cas.

#### 8.4 SOUDURES D'ANGLE

##### 8.4.1 Contraintes

$\sigma_{\perp}$   $\tau_{\parallel}$   $\tau_{\perp}$  composantes déterminées par la résistance des matériaux de la contrainte moyenne rapportée à la section de gorge du cordon, (section minimale de surface  $a \cdot l$ ).

$\sigma_{\parallel}$  contrainte normale rapportée à la section transversale de gorge du cordon (on n'en tient pas compte dans les calculs de vérification).

##### 8.4.2 Vérification de la résistance

###### 8.4.2.1 Formule de vérification

Les composantes  $\sigma_{\perp}$   $\tau_{\perp}$  et  $\tau_{\parallel}$  doivent satisfaire aux inégalités

$$k \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \sigma_e$$

$$\sigma_{\perp} \leq \sigma_e$$

# RÉSISTANCE DES ASSEMBLAGES SOUDÉS PAR CORDONS D'ANGLE ANALYSE ÉLASTIQUE

par I. RYAN et A. BUREAU

1

Des cas simples d'assemblages soudés par des cordons d'angle, sous sollicitation statique, sont étudiés dans le cadre de l'application de l'EC3-DAN [1]. En premier lieu, quelques considérations concernant le comportement de ces assemblages sont présentées sur la base d'observations expérimentales. Les méthodes de vérification de la résistance de cordons de soudure symétriques par rapport au plan de leur gorge sont expliquées, en considérant une répartition dite «élastique» de la sollicitation. L'Eurocode 3 (§ 6.6.4 (1)) permet également une répartition plastique qui fera l'objet d'une autre note technique.

La présente note technique propose des tableaux destinés à faciliter l'application des formules pour des cas courants.

## 1. - RÉSISTANCE EXPÉRIMENTALE DES SOUDURES PAR CORDONS D'ANGLE

Le comportement des soudures par cordons d'angle a été observé expérimentalement. Des essais ont été réalisés sur des assemblages de plats par cordons pour différentes valeurs de l'angle entre l'axe du cordon et la direction de l'effort comme indiqué à la figure 1.

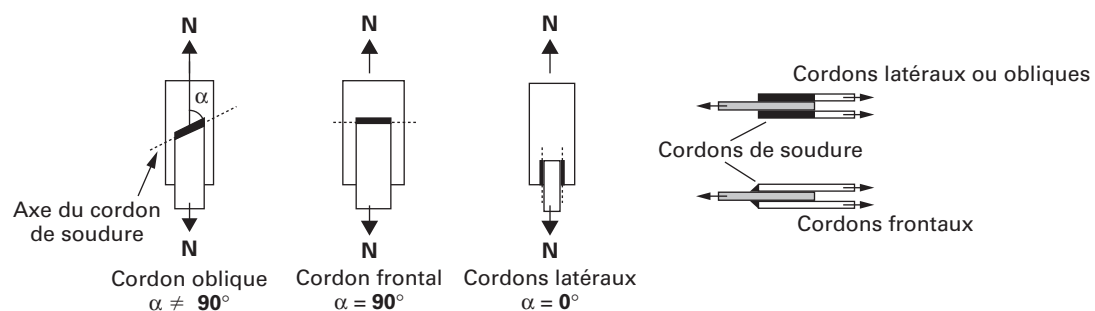


Fig. 1

I. RYAN – Ingénieur principal au CTICM  
A. BUREAU – Ingénieur au CTICM

### ASS-EC3 1-99

La résistance ultime en traction de l'acier qui constitue les plats est de 511 N/mm<sup>2</sup> [2]. Le cordon a une longueur de 50 mm et une gorge de 8 mm. La résistance en traction de la matière apportée est de 565 N/mm<sup>2</sup>.

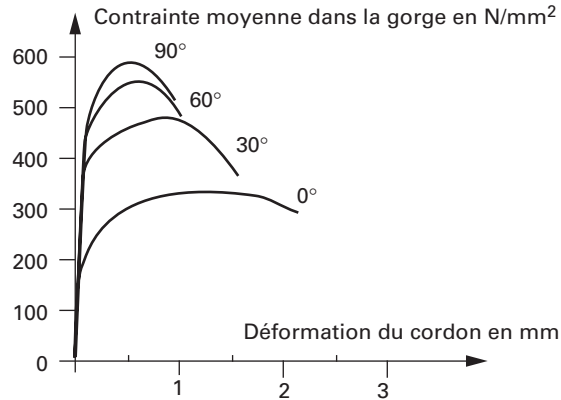


Fig. 2

Les courbes présentées à la figure 2 décrivent le comportement des assemblages pour différents angles du cordon par rapport à la direction de l'effort appliqué. La contrainte portée en ordonnée du graphe est la contrainte moyenne dans le plan de la gorge qui est calculée par :

$$\sigma_{moy} = \frac{N}{aL_w}$$

où  $N$  : effort appliqué,

$a$  : dimension de la gorge,

$L_w$  : longueur totale utile des cordons d'angle.

La résistance du cordon de soudure frontal (axe du cordon perpendiculaire à la direction de la charge appliquée) est plus élevée que celle du cordon latéral (axe de la soudure parallèle à la direction de la charge appliquée). D'autres résultats confirment cette observation et permettent d'affirmer que la résistance d'un cordon frontal est entre 1,5 et 2 fois celle d'un cordon latéral.

En revanche, la ductilité du cordon frontal est limitée, la rupture ayant lieu pour une déformation inférieure à 1 mm. Le cordon latéral présente une meilleure ductilité : la rupture a lieu pour une déformation d'environ 2 mm. Il faut relativiser cette constatation en considérant le petit volume de matière concerné par la rupture de la soudure. Dans le cas présent, rappelons qu'il s'agit de cordons d'angle d'une dimension de gorge de 8 mm.

La non-linéarité du comportement, qui se manifeste pour des niveaux de sollicitation relativement faibles, s'explique par des concentrations de contrainte à la racine et aux extrémités des soudures et par la présence de contraintes résiduelles.

Si l'on peut considérer que la sollicitation principale du cordon latéral est un cisaillement dans le plan de la gorge, parallèle à son axe, il est évident que l'effort appliqué au cordon oblique ou frontal introduit un état de contraintes beaucoup plus complexe.

Principalement à cause de cet état complexe, des incertitudes concernant les valeurs des caractéristiques du matériau d'apport et surtout des contraintes résiduelles dans la

soudure, l'établissement d'un modèle de comportement s'avère délicat. À notre connaissance, aucun modèle théorique ou étude numérique ne semble actuellement être capable de reproduire d'une manière satisfaisante le comportement réel en fonction du type de sollicitation et du type de cordon de soudure.

C'est pour cette raison que la grande majorité des normes actuelles (norme NF P 22-470 [3], Eurocode 3, ...) s'inspirent des recommandations établies initialement par l'IIS [4]. Ces recommandations, reprises en suite par la CECM [5], ont été élaborées à la suite d'un grand programme d'essais internationaux réalisés dans les années 1960 et 1970. Des programmes d'essais (CECA et UE) sont en cours pour étudier les soudures d'éléments en acier à haute limite d'élasticité et en acier inoxydable et pour compléter ainsi les travaux réalisés depuis l'étude de l'IIS.

## 2. – CONTRAINTE EFFECTIVE DANS UN CORDON DE SOUDURE

Les conclusions principales de l'étude de l'IIS sont les suivantes :

- la résistance d'un cordon de soudure peut être établie en se référant aux contraintes moyennes dans le plan de la gorge, malgré le fait que le plan de rupture ne soit pas forcément le plan de la gorge.

Pour décrire l'état de contrainte dans la gorge d'un cordon de soudure, les contraintes suivantes sont utilisées (fig. 3) :

$\sigma_{\perp}$  : contrainte normale perpendiculaire au plan de la gorge de la soudure,

$\tau_{\perp}$  : contrainte de cisaillement dans le plan de la gorge, perpendiculaire à l'axe de la soudure,

$\tau_{//}$  : contrainte de cisaillement dans le plan de la gorge, parallèle à l'axe de la soudure.

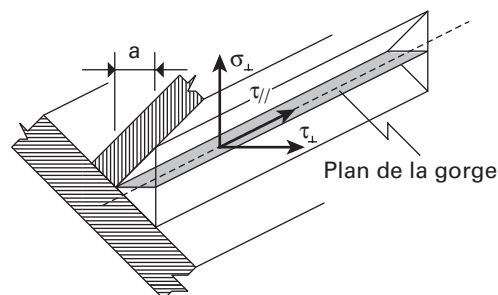


Fig. 3

- les contraintes normales parallèles à l'axe du cordon ( $\sigma_{//}$ ) peuvent être négligées. Il s'agit des contraintes normales imposées par la sollicitation des éléments attachés (les contraintes de flexion dans les soudures âme/semelle d'une poutre par exemple) et des contraintes résiduelles dues aux retraits des soudures.
- la résistance à la rupture du cordon doit être vérifiée en comparant la valeur d'une contrainte effective dans la gorge de la soudure à une limite de résistance. Ce critère est, de préférence, relatif à la résistance du matériau de base des pièces assemblées, et non à la résistance du matériau d'apport.

**ASS-EC3 1-99**

La formule de base proposée par l'IIS pour la contrainte effective dans la soudure est :

$$\sigma_w = \beta_w \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \gamma(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}$$

La vérification de la résistance d'un cordon de soudure en un point de la gorge où les contraintes sont calculées, consiste à satisfaire la condition suivante :

$$\sigma_w \leq \sigma_{lim}$$

*Limite de résistance  $\sigma_{lim}$*

Alors que dans la norme française NF P 22-470 [3], la limite de résistance est la limite d'élasticité  $\sigma_e$  de l'acier de base, dans l'Eurocode 3, il s'agit de la résistance ultime en traction de l'acier de base divisée par un coefficient partiel de sécurité :  $f_u/\gamma_{Mw}$ .

*Coefficient  $\gamma$*

Dans les normes, le facteur  $\gamma$  dans la formule de base prend des valeurs qui varient entre 1,8 et 3. Dans les règles CM 66 [6], on trouve la valeur de 1,8 alors que dans les recommandations de la CECM [5], il a été décidé de prendre la valeur de 3 afin de retrouver l'expression du critère de **Von Mises**. Ce dernier choix est plus pénalisant pour les contraintes de cisaillement.

La valeur de 3 a été adoptée dans la norme NF P 22-470 et dans l'Eurocode 3.

*Coefficient  $\beta_w$*

Le coefficient  $\beta_w$  (désigné par  $K$  dans la norme NF P 22-470) a une valeur qui dépend de la nuance de l'acier de base et varie de 0,7 à 1,0. Ce facteur tient compte du fait que la formule est sensée représenter la valeur de la contrainte de calcul à la rupture dans la soudure tandis que le critère de résistance utilisé est relatif à la résistance du matériau de base.

Une électrode bien adaptée au matériau de base garantit une résistance ultime du matériau d'apport qui est sensiblement plus grande que celle de l'acier des pièces assemblées. Néanmoins, la valeur du rapport entre ces deux résistances diminue lorsque la résistance du matériau de base augmente. Par conséquent, et compte tenu que la ductilité est plus faible pour les aciers plus résistants, les valeurs adoptées pour  $\beta_w$  augmentent avec la résistance de l'acier de base.

En conséquence, l'expression de base du critère de vérification de l'Eurocode 3 pour un cordon de soudure est la suivante (cf. Annexe **M** de l'Eurocode 3) :

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

Toutefois, l'Eurocode 3 exige une condition supplémentaire :

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}}$$

4

L'EC3-DAN (§ 6.1.1 (2) I et § 6.6.5.3 (5)) et l'Annexe D pour les aciers S420 et S460 fixent les valeurs du facteur de corrélation  $\beta_w$  et du coefficient partiel de sécurité  $\gamma_{Mw}$  comme suit :

TABLEAU 1

Nuance	S235	S275	S355	S420	S460
$\beta_w$	0,80	0,85	0,90	1,00	1,00
$\gamma_{Mw}$	1,25	1,30	1,35	1,25	1,25

Application aux cas représentés à la figure 1

Pour les géométries représentées à la figure 1, nous pouvons exprimer les composantes de la contrainte induite par l'effort  $N_{Sd}$  dans la gorge du cordon de soudure. Rappelons qu'il s'agit de cordons de soudure symétriques par rapport au plan de la gorge.

$$\sigma_{\perp} = \frac{N_{Sd}}{L_w a} \left( \frac{\sin \alpha}{\sqrt{2}} \right)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{N_{Sd}}{L_w a} \left( \frac{\sin \alpha}{\sqrt{2}} \right)$$

$$\tau_{//} = \frac{N_{Sd}}{L_w a} (\cos \alpha)$$

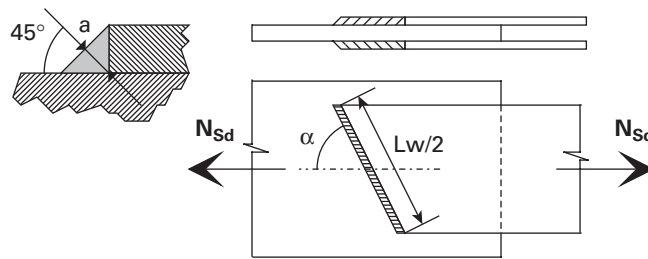


Fig. 4

$L_w$  : longueur utile totale des cordons  
(voir définition de la longueur utile : EC3 § 6.6.5.1),

$N_{Sd}$  : effort axial de calcul,

L'expression de la contrainte effective devient alors :

$$\sigma_w = \beta_w \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} = \beta_w \sqrt{3 - \sin^2 \alpha} \frac{N_{Sd}}{L_w a} \quad \sigma_w = \beta_w G_0 \frac{N_{Sd}}{L_w a}$$

En appliquant le critère de résistance de l'Eurocode 3,

$$N_{Sd} \leq N_{Rd}$$

À condition que  $\sigma_{\perp} \leq f_u/\gamma_{Mw}$ , on peut en déduire l'effort normal résistant de calcul :

$$N_{Rd} = (L_w a) \frac{f_u/\gamma_{Mw}}{\beta_w \sqrt{3 - \sin^2 \alpha}},$$

et la résistance par unité de longueur :  $F_{w,Rd} = \frac{N_{Rd}}{L_w} = a f_{vw,d} = a \left[ \frac{f_u/\gamma_{Mw}}{\beta_w \sqrt{3 - \sin^2 \alpha}} \right]$



### ASS-EC3 1-99

Le diagramme de la figure 5 présente l'évolution de la résistance de calcul en fonction de l'angle. On a porté en abscisse l'angle  $\alpha$ , et en ordonnée le rapport de la résistance de calcul pour l'angle  $\alpha$  à celle obtenue par le calcul pour  $\alpha = 0^\circ$  (cordons latéraux).

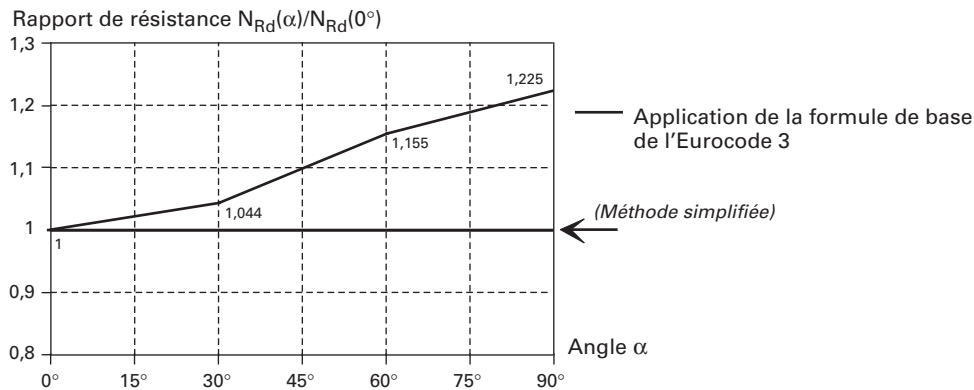


Fig. 5

### 3. – MÉTHODE SIMPLIFIÉE POUR LA VÉRIFICATION DES SOUDURES

Une méthode plus simple pour la vérification de la résistance des cordons de soudure est de négliger la variation de la résistance de la soudure avec la direction de l'effort appliqué : le coefficient  $\gamma = 3$  s'applique alors aux trois composantes de la contrainte. Les essais sur les assemblages soudés confirment la nature sécuritaire de cette approche.

Pour illustrer la méthode, prenons le cas d'un assemblage du type présenté à la figure 1. L'application de la méthode simplifiée revient à comparer, quel que soit la direction de l'effort  $N_{Sd}$  appliqué à l'assemblage, la contrainte effective simplifiée suivante au critère de résistance :

$$\sigma_{w.simpl.} = \beta_w \sqrt{3 (\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} = \beta_w \sqrt{3} [\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2}] = \beta_w \sqrt{3} \left[ \frac{N_{Sd}}{L_w a} \right]$$

L'application de la méthode simplifiée consiste à vérifier un critère unique (EC3 § 6.6.5.3) :

$$\sigma_{w.simpl.} = \beta_w \sqrt{3} \left[ \frac{N_{Sd}}{\sum_i L_i a_i} \right] \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}} \quad \text{soit} \quad \frac{N_{Sd}}{L_w} = F_{w.Rd} \leq a \left[ \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{Mw}} \right] = a f_{vw.d}$$

On constate que l'application de la méthode simplifiée ne nécessite de connaître que la charge appliquée au point considéré de la soudure. Avec cette approche, la résistance d'un cordon d'angle oblique est sous-estimée parce qu'elle est prise égale à celle d'un cordon d'angle latéral. Pour des assemblages entre deux plats perpendiculaires ou parallèles, la sous-estimation de la résistance des cordons de soudure obliques ne peut être supérieure à 22,5%.

**4. – APPLICATION DE LA FORMULE DE BASE DE L'EC3  
AUX SOUDURES DE PIÈCES SOUMISES À UN EFFORT NORMAL**

**4.1. – Assemblages par double cordon d'angle**

Appliquons la formulation de l'Eurocode 3 au cas d'assemblages de deux plats par deux cordons d'angle (fig. 6) :

- assemblage de deux plats parallèles par deux cordons frontaux,
- assemblage de deux plats parallèles par deux cordons latéraux,
- assemblage oblique de l'extrémité d'un plat sur un autre plat, l'effort  $N_{Sd}$  étant dans le plan du premier.

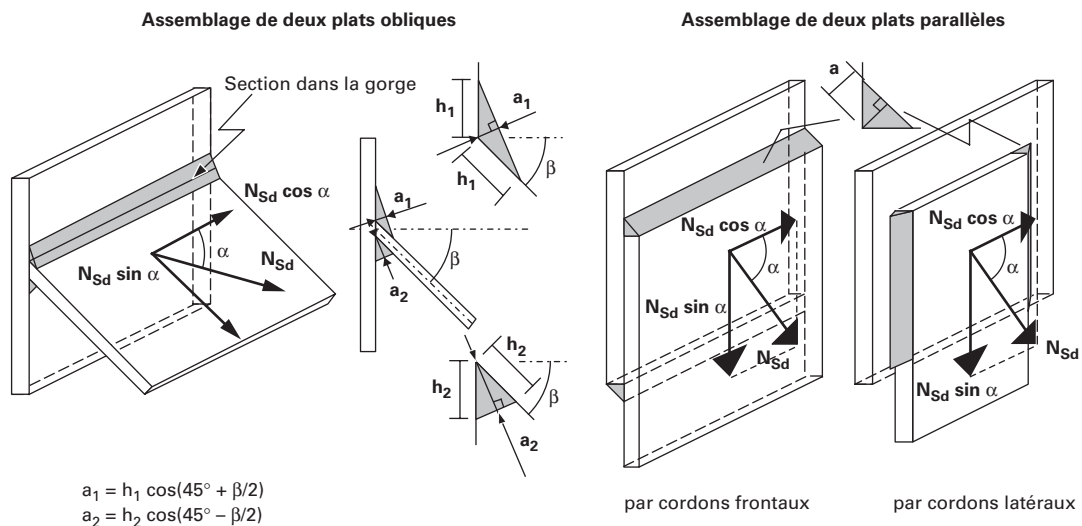


Fig. 6

Nous nous proposons d'établir les expressions, puis des tableaux qui permettront au calculateur une application aisée du critère de résistance de l'Eurocode 3 pour ce type d'assemblage.

L'effort  $N_{Sd}$  se répartit en un effort  $N_{Sd,1}$  appliqué au cordon de l'angle obtus et un effort  $N_{Sd,2}$  appliqué au cordon de l'angle aigu ( $N_{Sd} = N_{Sd,1} + N_{Sd,2}$ ). Si nous considérons que l'effort  $N_{Sd}$  se répartit proportionnellement à la section résistante des cordons, nous avons :

$$N_{Sd,1} = N_{Sd} \left[ \frac{a_1 L_1}{a_1 L_1 + a_2 L_2} \right] \quad \text{et} \quad N_{Sd,2} = N_{Sd} \left[ \frac{a_2 L_2}{a_1 L_1 + a_2 L_2} \right]$$

Il est possible de déterminer les expressions des composantes de la contrainte appliquée dans le plan de la gorge du cordon de l'angle obtus, ainsi que celles des composantes dans le plan de la gorge de l'angle aigu. La contrainte effective peut aussi être exprimée pour chacun des deux cordons de soudure. On obtient alors :

- pour l'angle obtus :  $\sigma_{w,1} = \beta_w G_1 \frac{N_{Sd,1}}{a_1 L_1}$  avec :  $G_1 = \sqrt{3 - (1 + \sin \beta) \sin^2 \alpha}$

7

**ASS-EC3 1-99**

- pour l'angle aigu :  $\sigma_{w,2} = \beta_w G_2 \frac{N_{Sd,2}}{a_2 L_2}$  avec :  $G_2 = \sqrt{3 - (1 - \sin \beta) \sin^2 \alpha}$

Une vérification individuelle de chacun des cordons ne suppose aucune redistribution plastique entre les deux cordons de soudure. Il convient alors de satisfaire les conditions suivantes pour chaque cordon :

- pour l'angle obtus :  $\sigma_{w,1} \leq f_u / \gamma_{Mw}$  soit :  $G_1 \frac{N_{Sd}}{a_1 L_1 + a_2 L_2} \leq \frac{f_u / \gamma_{Mw}}{\beta_w}$

et 
$$\sigma_{\perp} = \frac{N_{Sd}}{a_1 L_1 + a_2 L_2} \sin(\alpha) \sin\left(45^\circ + \frac{\beta}{2}\right) \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}}$$

- pour l'angle aigu :  $\sigma_{w,2} \leq f_u / \gamma_{Mw}$  soit :  $G_2 \frac{N_{Sd}}{a_1 L_1 + a_2 L_2} \leq \frac{f_u / \gamma_{Mw}}{\beta_w}$

et 
$$\sigma_{\perp} = \frac{N_{Sd}}{a_1 L_1 + a_2 L_2} \sin(\alpha) \sin\left(45^\circ - \frac{\beta}{2}\right) \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}}$$

Les valeurs des coefficients  $G_1$  et  $G_2$  sont données dans les tableaux suivants. Rappelons que ces coefficients sont applicables pour des cordons symétriques par rapport au plan de leur gorge. Il est à noter qu'à la différence des tableaux donnés en annexe de la norme française NF P 22-470, les valeurs de ces coefficients ne dépendent pas de l'acier utilisé. Une interpolation linéaire entre deux valeurs consécutives du tableau est admise.

On remarque que lorsque l'angle  $\beta$  est supérieur à  $0^\circ$ , la contrainte effective du cordon d'angle aigu est toujours plus grande que celle du cordon d'angle obtus. La vérification du cordon d'angle obtus pourrait se limiter au critère sur la contrainte  $\sigma_{\perp}$ . Pour un angle  $\beta \leq 40^\circ$ , cette dernière vérification n'est jamais déterminante pour aucun des deux cordons.

*Cas des assemblages de plats parallèles*

Pour le cas des assemblages de plats parallèles (cas où l'angle  $\beta = 90^\circ$ ), une ligne supplémentaire donne la valeur particulière du coefficient à utiliser :

$$G_0 = \sqrt{3 - \sin^2 \alpha}$$

Ce coefficient est utilisé lorsque le cordon est symétrique et est posé entre deux faces perpendiculaires. On se situe dans les mêmes conditions dans le cas d'un assemblage de deux plats perpendiculaires ( $\beta = 0^\circ$ ).

*Cas particulier d'un assemblage soudé transmettant un effort de cisaillement parallèle aux cordons*

Un exemple d'assemblage transmettant un effort de cisaillement est celui d'une platine soudée uniquement sur l'âme à l'extrémité d'une poutre (fig. 7) par un double cordon. Ce double cordon doit transmettre l'effort tranchant de la poutre. Il s'agit de cordons latéraux où l'on vérifie que :

$$\sigma_w = \beta_w \frac{V_{Sd}}{\sum_i L_i a_i} \quad G_0 = \beta_w \frac{V_{Sd}}{2 L_w a} \sqrt{3} \leq f_u / \gamma_{Mw}$$

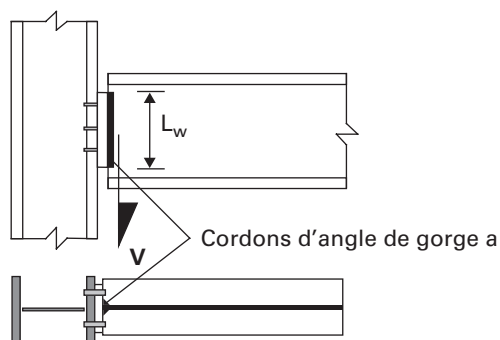


Fig. 7

9

**TABLEAU 2**

Tableau 2-a : Coefficient  $G_1$  : angle obtus

$\beta \backslash \alpha$	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	90°
0°	1,732	1,723	1,698	1,658	1,608	1,581	1,553	1,500	1,455	1,425	1,414
5°	1,732	1,723	1,695	1,652	1,597	1,567	1,537	1,478	1,428	1,395	1,383
10°	1,732	1,722	1,692	1,645	1,586	1,553	1,520	1,456	1,401	1,364	1,351
15°	1,732	1,721	1,689	1,639	1,575	1,540	1,504	1,434	1,374	1,334	1,320
20°	1,732	1,720	1,686	1,632	1,564	1,526	1,487	1,412	1,347	1,303	1,288
25°	1,732	1,720	1,683	1,626	1,553	1,513	1,471	1,390	1,321	1,273	1,256
30°	1,732	1,719	1,681	1,620	1,543	1,500	1,456	1,369	1,294	1,243	1,225

Tableau 2-b : Coefficient  $G_2$  : angle aigu

$\beta \backslash \alpha$	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	90°
0°	1,732	1,723	1,698	1,658	1,608	1,581	1,553	1,500	1,455	1,425	1,414
5°	1,732	1,724	1,701	1,665	1,620	1,595	1,570	1,522	1,481	1,454	1,445
10°	1,732	1,725	1,704	1,671	1,631	1,608	1,586	1,543	1,507	1,483	1,474
15°	1,732	1,726	1,707	1,678	1,641	1,622	1,602	1,563	1,532	1,510	1,503
20°	1,732	1,726	1,710	1,684	1,652	1,634	1,617	1,583	1,555	1,537	1,530
25°	1,732	1,727	1,712	1,690	1,662	1,647	1,631	1,602	1,578	1,562	1,556
30°	1,732	1,728	1,715	1,696	1,671	1,658	1,645	1,620	1,600	1,586	1,581

**Remarques :** 1) le cas de plats perpendiculaires correspond à  $\beta = 0^\circ$ .

2) D'après le paragraphe **6.6.2.2 (2)** de l'Eurocode 3, l'angle entre deux plats peut être inférieur à  $60^\circ$  ( $\beta > 30^\circ$ ). La soudure doit être alors considérée comme une soudure en bout à pénétration partielle.

## ASS-EC3 1-99

Tableau 2-c : Coefficient géométrique  $G_0$  : Assemblages de plats parallèles

$\beta \backslash \alpha$	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	90°
90°	1,732	1,723	1,698	1,658	1,608	1,581	1,553	1,500	1,455	1,425	1,414

## 4.2. – Assemblages soudés constitués de cordons de divers types

Aux paragraphes précédents nous n'avons traité que des soudures constituées par des cordons d'angle, droits et parallèles entre eux.

La méthode peut être étendue à toutes les soudures dans un plan ayant une forme quelconque où l'on admet une répartition uniforme de l'effort normal dans les cordons. Pour le cas général, chaque point de la soudure a une valeur spécifique de l'angle  $\alpha$ . Le point critique de la soudure va très probablement être celui où la valeur de la contrainte effective est la plus grande. Il s'agit du point (ou des points) où la valeur de l'angle  $\alpha$  est la plus petite. On doit vérifier la résistance en ce point de la soudure, mais aussi vérifier que la condition sur la contrainte  $\sigma_{\perp}$  est satisfaite en tout point de la soudure.

Prenons l'exemple d'un plat rectangulaire soudé sur trois bords sur un autre plat parallèle ( $\beta = 90^\circ$ ) :

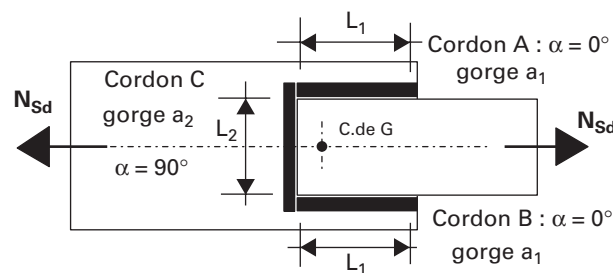


Fig. 8

Pour cet assemblage, le cordon critique est le cordon A (ou B). S'agissant d'un cordon latéral (angle  $\alpha = 0^\circ$ ), la valeur du coefficient géométrique à utiliser est  $G_0 = \sqrt{3}$ . La vérification pour ce cas est :

$$\sigma_{wA} = \sigma_{wB} = \beta_w \left( \frac{N_{Sd}}{\sum_i a_i L_i} \right) G_0 = \beta_w \left( \frac{N_{Sd}}{2 a_1 L_1 + a_2 L_2} \right) \sqrt{3} \leq f_u / \gamma_{Mw}$$

## 5. – DIMENSIONS FORFAITAIRES DES CORDONS D'ANGLE

Afin d'éviter la vérification des soudures, on peut utiliser des dimensions forfaitaires pour les gorges de cordons d'angle à utiliser pour les assemblages soudés.

La dimension minimale requise de la gorge de chacun des cordons d'angle dépend du type d'assemblage.

**5.1. – Assemblages en T avec double cordon d’angle frontal transmettant un effort normal**

(assemblage platine-semelle à l’extrémité d’une poutre par exemple) :

$$\min(a) = \frac{N_{Sd}}{2 L_w} \frac{\beta_w \sqrt{2}}{f_u / \gamma_{Mw}}$$

Afin que les doubles cordons utilisés aient une résistance égale à la résistance de calcul plastique de la section de la pièce attachée (de largeur  $b$  et d’épaisseur  $t$ ), on pose :

$$N_{Sd} = N_{pl.Rd} = b t f_y / \gamma_{M0}$$

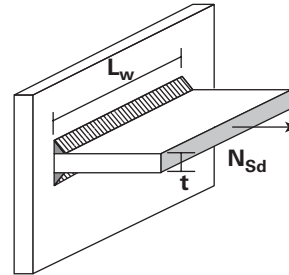


Fig. 9

En posant  $L_w = b$ , on obtient :

$$\frac{\min(a)}{t} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{f_y}{f_u} \frac{\beta_w \gamma_{Mw}}{\gamma_{M0}} \right]$$

Le tableau 3 donne la valeur minimale requise du rapport gorge/épaisseur pour les différents aciers en application de l’EC3-DAN. Dans ce tableau, les valeurs de la limite d’élasticité et de la résistance ultime en traction de l’acier sont celles des normes NF EN 10025 [7] et NF EN 10113 [8] en fonction de l’épaisseur de la pièce assemblée. Pour la norme NF EN 10113, les valeurs pour les aciers S420 et S460 ont été calculées en se référant à l’Annexe D de l’Eurocode 3 [9].

**TABLEAU 3**

**Dimension forfaitaire de la gorge de chaque cordon  
Assemblages double-cordon en T transmettant seulement un effort normal**

Tableau 3-a : Aciers de la norme NF EN 10025 [7]

Désignation	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_{M0}$ (*)	$\gamma_{Mw}$	$\beta_w$	$\min(a)/t$
pour $3 \text{ mm} \leq t \leq 16 \text{ mm}$						
S235	235	340	1,10	1,25	0,80	0,444
S275	275	410	1,10	1,30	0,85	0,476
S355	355	490	1,10	1,35	0,90	0,566
pour $16 \text{ mm} < t \leq 40 \text{ mm}$						
S235	225	340	1,10	1,25	0,80	0,425
S275	265	410	1,10	1,30	0,85	0,459
S355	345	490	1,10	1,35	0,90	0,550

\* Lorsque  $\gamma_{M0} = 1,0$ , il faut augmenter la dimension de la gorge de 10%.

## ASS-EC3 1-99

Tableau 3-b : Aciers de la norme NF EN 10113 [8]

Désignation	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_{M0}$ (*)	$\gamma_{Mw}$	$\beta_w$	min(a)/t
pour $3 \text{ mm} \leq t \leq 16 \text{ mm}$						
S275	275	370	1,10	1,30	0,85	0,528
S355	355	470	1,10	1,35	0,90	0,590
S420	420	520	1,10	1,25	1,00	0,649
S460	460	550	1,10	1,25	1,00	0,672
pour $16 \text{ mm} < t \leq 40 \text{ mm}$						
S275	265	370	1,10	1,30	0,85	0,509
S355	345	470	1,10	1,35	0,90	0,573
S420	400	520	1,10	1,25	1,00	0,618
S460	440	550	1,10	1,25	1,00	0,643

\* Lorsque  $\gamma_{M0} = 1,0$ , il faut augmenter la dimension de la gorge de 10%.

Pour les assemblages par platine d'extrémité soudée-boulonnée transmettant un moment de flexion, les cordons d'âme-platine et semelles-platine doivent avoir des dimensions minimales de gorge données au tableau précédent lorsqu'aucune vérification spécifique de leur résistance n'est entreprise.

### 5.2. – Assemblage en T avec double cordon latéral transmettant seulement un effort de cisaillement

(assemblage d'une platine d'extrémité soudée uniquement sur l'âme d'une poutre) :

$$\min(a) = \frac{V_{Sd}}{2 L_w} \frac{\beta_w \sqrt{3}}{f_u / \gamma_{Mw}}$$

Afin que les doubles cordons aient une résistance égale à la résistance de calcul plastique de la section de la pièce attachée (de hauteur d'âme  $h_w$  et d'épaisseur d'âme  $t_w$ ), on pose,

$$V_{Sd} = V_{pl.Rd} = h_w t_w \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}}$$

On obtient :

$$\frac{\min(a)}{t} = \frac{1}{2} \left[ \frac{f_y}{f_u} \frac{\beta_w \gamma_{Mw}}{\gamma_{M0}} \right] \frac{h_w}{L_w}$$

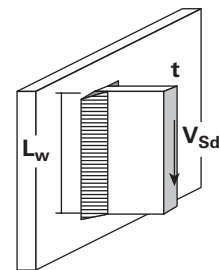


Fig. 10

Le tableau 4 donne la valeur minimale requise du rapport gorge/épaisseur pour les différents aciers en application de l'EC3-DAN. Parce que la valeur du tableau correspond à une valeur de  $h_w/L_w$  égale à 1,0, il y a lieu de multiplier la dimension de la gorge par  $h_w/L_w$  lorsque cette valeur est plus grande que 1,0.

**ASS-EC3 1-99**

Dans ce tableau les valeurs de la limite d'élasticité et de la résistance ultime à la traction de l'acier ont été prises égales aux valeurs des normes NF EN 10025 [7] et NF EN 10113 [8] en fonction de l'épaisseur de la pièce assemblée. Pour les aciers S420 et S460, les valeurs ont été calculées en se référant à l'Annexe D de l'Eurocode 3 [9].

**TABLEAU 4**  
**Dimension forfaitaire de la gorge de chaque cordon**  
**Assemblages double-cordon en T transmettant seulement un effort de cisaillement**  
*Tableau 4-a : Aciers de la norme NF EN 10025 [7]*

Désignation	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_{M0}$ (*)	$\gamma_{Mw}$	$\beta_w$	min(a)/t (**)
pour 3 mm ≤ t ≤ 16 mm						
S235	235	340	1,10	1,25	0,80	0,314
S275	275	410	1,10	1,30	0,85	0,337
S355	355	490	1,10	1,35	0,90	0,400
pour 16 mm < t ≤ 40 mm						
S235	225	340	1,10	1,25	0,80	0,301
S275	265	410	1,10	1,30	0,85	0,325
S355	345	490	1,10	1,35	0,90	0,389

\* Lorsque  $\gamma_{M0} = 1,0$ , il faut augmenter la dimension de la gorge de 10%.  
 \*\* Valeur à multiplier par  $h_w/L_w$  lorsque celle-ci est supérieure à 1,0.

*Tableau 4-b : Aciers de la norme NF EN 10113 [8]*

Désignation	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_{M0}$ (*)	$\gamma_{Mw}$	$\beta_w$	min(a)/t (**)
pour 3 mm ≤ t ≤ 16 mm						
S275	275	370	1,10	1,30	0,85	0,373
S355	355	470	1,10	1,35	0,90	0,417
S420	420	520	1,10	1,25	1,00	0,459
S460	460	550	1,10	1,25	1,00	0,475
pour 16 mm ≤ t ≤ 40 mm						
S275	265	370	1,10	1,30	0,85	0,360
S355	345	470	1,10	1,35	0,90	0,405
S420	400	520	1,10	1,25	1,00	0,437
S460	440	550	1,10	1,25	1,00	0,455

\* Lorsque  $\gamma_{M0} = 1,0$ , il faut augmenter la dimension de la gorge de 10%.  
 \*\* Valeur à multiplier par  $h_w/L_w$  lorsque celle-ci est supérieure à 1,0.



## ASS-EC3 1-99

### 5.3. – Assemblage âme-semelle d'une PRS

$$\min(a) \approx \frac{V_{Sd}}{2 h_w} \frac{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{3}}{f_u}$$

Afin que les doubles cordons aient une résistance égale à la résistance de calcul plastique de la section de l'âme attachée (de hauteur d'âme  $h_w$  et d'épaisseur d'âme  $t_w$ ), on pose :

$$V_{Sd} = V_{pl.Rd} = h_w t_w \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}}$$

On obtient :

$$\frac{\min(a)}{t} = \frac{1}{2} \left[ \frac{f_y}{f_u} \frac{\beta_w \gamma_{Mw}}{\gamma_{M0}} \right]$$

Le tableau 4 donne la valeur minimale requise du rapport gorge/épaisseur pour les différentes nuances d'acier en application de l'EC3-DAN.

## 6. – EXEMPLES D'APPLICATION

### 6.1. – Exemple 1

Cet exemple est une simple application des expressions qui ont été présentées précédemment.

Il s'agit d'un assemblage de deux plats en acier S355 de la norme NF EN 10025, par deux cordons d'angle de largeur de gorge identique (fig. 11).

Rappelons que l'on doit vérifier :

- pour l'angle obtus :  $G_1 \frac{N_{Sd}}{a_1 L_1 + a_2 L_2} \leq \frac{f_u / \gamma_{Mw}}{\beta_w}$
- pour l'angle aigu :  $G_2 \frac{N_{Sd}}{a_1 L_1 + a_2 L_2} \leq \frac{f_u / \gamma_{Mw}}{\beta_w}$

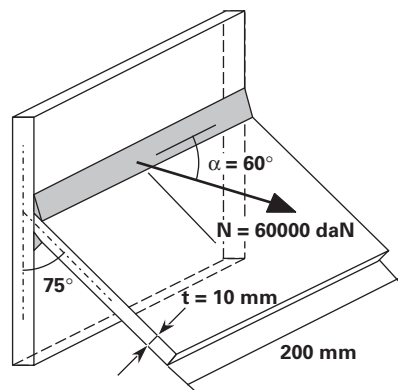


Fig. 11

Dans notre exemple, nous avons :

$$a_1 L_1 + a_2 L_2 = 2 a L$$

$$G_1 = 1,434 \quad (\text{voir tableau 2-a})$$

$$G_2 = 1,563 \quad (\text{voir tableau 2-b})$$

$$\gamma_{Mw} = 1,35 \quad (\text{voir tableau 3-a})$$

$$\beta_w = 0,90 \quad (\text{voir tableau 3-a})$$

$$f_u = 49 \text{ daN/mm}^2 \quad (\text{voir tableau 3-a})$$

La condition pour l'angle aigu est la plus défavorable, et la condition de résistance s'exprime donc par :

$$\frac{G_2 N_{Sd}}{2 a L} \leq \frac{f_u / \gamma_{Mw}}{\beta_w}$$

On peut en déduire la gorge minimale :

$$a \geq \frac{G_2 N_{Sd}}{2 L} \frac{\beta_w \gamma_{Mw}}{f_u} \quad \text{soit : } a \geq 5,81 \text{ mm}$$

On retiendra une dimension de gorge de 6 mm pour chaque cordon.

En utilisant la méthode simplifiée, la gorge minimale est :

$$a \geq \frac{\sqrt{3}}{2 L} N_{Sd} \frac{\beta_w \gamma_{Mw}}{f_u} = 6,44 \text{ mm.}$$

On retiendrait alors 6,5 mm ou 7 mm.

## 6.2. – Exemple 2

L'application suivante est un exemple qui n'entre pas précisément dans le domaine des assemblages qui ont été traités précédemment, car il s'agit d'un plat soudé par deux cordons parallèles sur une platine et soumis à une force oblique provoquant un moment au droit des cordons de soudure.

Un plat en acier S235 d'épaisseur 16 mm supporte un effort de 25000 daN comme indiqué sur la figure 12.

Il s'agit de dimensionner la gorge des cordons de soudure.

Pour l'acier choisi, nous avons :

$$f_y = 23,5 \text{ daN/mm}^2$$

$$f_u = 34 \text{ daN/mm}^2$$

et :

$$\beta_w = 0,8$$

$$\gamma_{Mw} = 1,25$$

## ASS-EC3 1-99

16

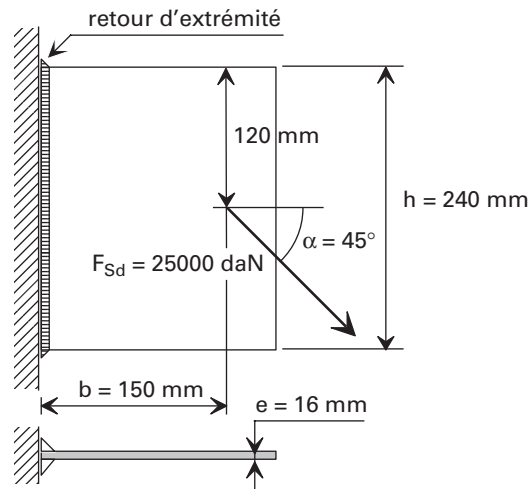


Fig. 12

Considérons la section transversale du plat au droit des cordons de soudure. Cette section est soumise à :

- un effort axial de traction  $N_{t.Sd} = 17\,678$  daN, composante horizontale de l'effort,
- un effort tranchant  $V_{Sd} = 17\,678$  daN, composante verticale de l'effort,
- un moment fléchissant  $M_{Sd} = b V_{Sd} = 2\,651,70$  daN.m

Dans l'hypothèse d'une répartition élastique des contraintes au droit de la soudure, nous pouvons calculer :

- la contrainte normale sur la fibre extrême tendue :

$$\sigma = \frac{N_{t.Sd}}{A} + \frac{M_{Sd}}{I_v} = \frac{17\,678}{240 \times 16} + \frac{2\,651\,700}{16 \times 240^2/6} = 21,87 \text{ daN/mm}^2$$

- la contrainte moyenne de cisaillement :

$$\tau = \frac{V_{Sd}}{A} = \frac{17\,678}{240 \times 16} = 4,60 \text{ daN/mm}^2$$

Au niveau de la fibre extrême tendue, l'effort perpendiculaire à l'axe de la soudure par unité de longueur, à reprendre par chaque cordon de soudure est :

$$\sigma e/2 = 21,87 \times 16/2 = 174,96 \text{ daN/mm}$$

Dans le plan de la gorge du cordon de soudure nous avons :

- une contrainte normale au plan de la gorge  $\sigma_{\perp}$ , telle que :

$$a \sigma_{\perp} = 174,96 \sin(45^\circ) = 123,72 \text{ daN/mm}$$

- une contrainte de cisaillement perpendiculaire à l'axe du cordon  $\tau_{\perp}$ , telle que :

$$a \tau_{\perp} = 174,96 \cos(45^\circ) = 123,72 \text{ daN/mm}$$

- une contrainte de cisaillement parallèle à l'axe du cordon  $\tau_{//}$ , telle que :

$$a \tau_{//} = 4,60 \times 16/2 = 36,83 \text{ daN/mm}$$

En appliquant le critère de résistance de l'Annexe M de l'Eurocode 3, on obtient la condition :

$$\frac{1}{a} \sqrt{123,72^2 + 3 (123,72^2 + 36,83)^2} \leq \frac{34}{0,8 \times 1,25}$$

Nous pouvons en déduire :  $a \geq 7,53 \text{ mm}$ .

Nous pouvons retenir :  $a = 8 \text{ mm}$ .

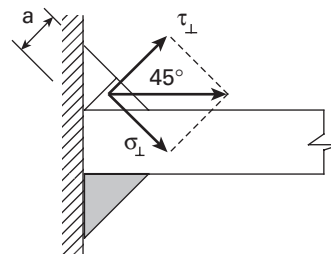


Fig. 13

17

### Application de la méthode de vérification du paragraphe 6.6.5.3 de l'Eurocode 3

Cette méthode simplifiée ne nécessite pas d'effectuer la décomposition de l'effort dans le plan de la gorge du cordon de soudure. Nous avons toutefois à reprendre par cordon :

- un effort perpendiculaire au cordon de 174,96 daN/mm,
- un effort parallèle au cordon de 36,83 daN/mm,

La résultante de ces efforts est : 178,79 daN/mm.

Le critère de résistance du paragraphe 6.6.5.3 de l'Eurocode 3 exige que :

$$\frac{178,79}{a} \leq \frac{34/\sqrt{3}}{0,8 \times 1,25}$$

Il en résulte :  $a \geq 9,31 \text{ mm}$ . Nous pourrions retenir 9 mm connaissant le caractère sécuritaire de la méthode.

### 7. - RÉFÉRENCES

- [1] **EC3-DAN** – Eurocode 3 « Calcul des structures en acier » et Document d'Application Nationale – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Indice de classement AFNOR : P 22-311.
- [2] **Clarke A.** – Msc Thesis. University of London – September 1971.
- [3] **Norme française NF P 22-470** : Assemblages soudés – Dispositions constructives et justification des soudures. AFNOR – Août 1989.
- [4] **Calcul des assemblages en acier soudés à l'arc sollicités statiquement.** Le soudage dans le monde. Vol. 14 N° 5/6. Revue de l'Institut International de la Soudure (IIS). 1976.

**ASS-EC3 1-99**

- [5] **European recommendations for steel constructions.** Convention Européenne de la Construction Métallique (CECM). Publication n° 23 – 1977.
- [6] **Règles CM 66 :** Règles de calcul des constructions en acier. Éditions Eyrolles. Décembre 1966.
- [7] **Norme française NF EN 10025** (indice de classement : A 35-501). Produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés. AFNOR. Décembre 1993.
- [8] **Norme française NF EN 10113** (indice de classement : A 35-505). Produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins. AFNOR. Juin 1993.
- [9] **Annexe D** [normative] Utilisation des nuances d'acier S 460 et S 420. XP ENV 1993-1-1/A1. Annexe à l'Eurocode 3 à paraître.

**18**