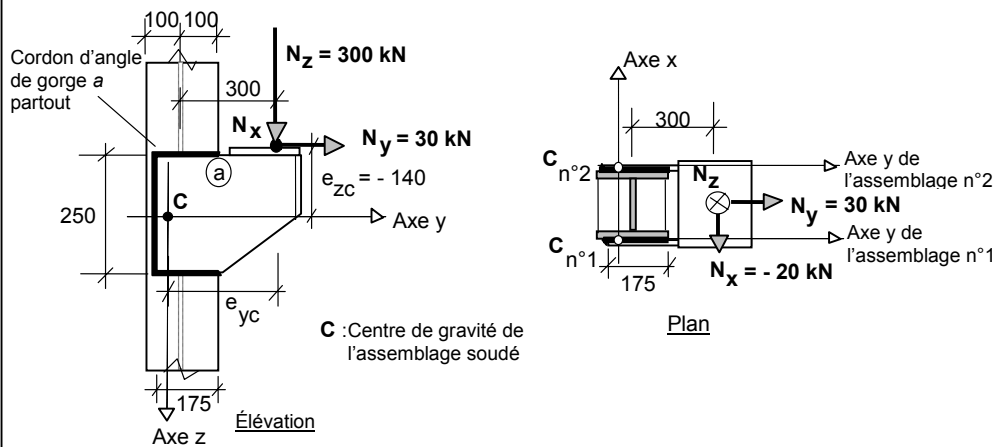




Affaire n°	Feuille	1 sur 9	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'INOX			
Sujet	<b>Exemple 5 – Assemblage soudé</b>			
Client	Rédigé par	IR	Date	Août 2002
CECA	Vérfié par	FH/NB	Date	Oct. 2002
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006

### EXEMPLE DE CALCUL N°5 – ASSEMBLAGE SOUDÉ

La configuration de l'assemblage et son chargement sont donnés sur la figure ci-dessous. On remarque deux assemblages plans identiques à soudure d'angle, d'épaisseurs de gorges constantes, dans deux plans parallèles, transmettant le chargement appliqué, il est demandé de dimensionner la gorge. Une soudure d'angle (cordon de soudure) symétrique est utilisée.



#### Caractéristiques des matériaux

L'acier inoxydable utilisé est de nuance 1.4401

Limite d'élasticité conventionnelle à 0,2% = 220 MPa et résistance ultime = 530 MPa

Prenons  $f_y = 220$  MPa et  $f_u = 530$  MPa

$E = 200\,000$  MPa et  $G = 76\,900$  MPa

La limite d'élasticité et la résistance ultime de la soudure sont supposées supérieures à celles du matériau de base.

#### Coefficient partiel et facteur de corrélation

Coefficient partiel pour la résistance des soudures :  $\gamma_{M2} = 1,25$

$\beta_w = 1,0$

On examinera la nécessité de tenir compte d'un facteur de réduction de la résistance de soudure dû à sa longueur.

#### Analyse

Une approche par analyse élastique est utilisée pour calculer les sollicitations dans la soudure d'angle symétrique (à angle droit et côtés égaux), pour le cas de chargement indiqué ci-dessus. Une analyse élastique de cet assemblage soudé conduit à une estimation de sa résistance qui place du côté de la sécurité.

Tableau 3.1

§ 3.2.4

§ 3.2.4

§ 6.4.1

Tableau 2.1

§ 6.4.2

EN 1993-1-8,  
Clause 2.5



Affaire n°	Feuille	2 sur 9	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'INOX			
Sujet	<b>Exemple 5 – Assemblage soudé</b>			
Client  CECA	Rédigé par	IR	Date	Août 2002
	Vérfié par	FH/NB	Date	Oct. 2002
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006

Les coordonnées  $(x_c, y_c, z_c)$  d'un point du cordon de soudure sont prises par référence à un système de coordonnées direct dont l'origine est au centre de gravité de l'assemblage soudé, considéré comme étant dans le plan y-z. (Pour le cas présent, d'un assemblage dans le plan y-z, on a  $x_c = 0$  partout).

Le but principal de l'analyse élastique est de déterminer les sollicitations de calcul induites dans le cordon de soudure aux points les plus sollicités, désignés souvent comme points « critiques ». Pour l'assemblage étudié ici, on peut considérer comme point critique le point le plus éloigné du centre de gravité de l'assemblage.

Les composantes de l'effort appliqué, son excentrement et les moments résultants agissant sur un assemblage soudé de forme générale et de centre de gravité C peuvent être déterminés à l'aide des expressions suivantes :

Effort appliqué

$$\overline{N_{w,Ed}} = [N_{x,Ed}, N_{y,Ed}, N_{z,Ed}]$$

Excentrement de l'effort appliqué

$$\overline{e_N} = [e_{xc}, e_{yc}, e_{zc}] \text{ sont les coordonnées du point d'application de l'effort } \overline{N_{w,Ed}}$$

Moments appliqués

$$M_{xc,Ed} = e_{yc} N_{z,Ed} - e_{zc} N_{y,Ed}$$

$$M_{yc,Ed} = e_{zc} N_{x,Ed} - e_{xc} N_{z,Ed}$$

$$M_{zc,Ed} = e_{xc} N_{y,Ed} - e_{yc} N_{x,Ed}$$

Pour un cas général de chargement, une analyse élastique linéaire de l'assemblage donne, au point de coordonnées  $(x_c, y_c, z_c)$ , les composantes de sollicitation par unité de longueur de cordon suivantes, où la dimension de la gorge est indiquée par  $a$  :

$$F_{wx,Ed} = a \left[ \frac{N_{x,Ed}}{A_w} + \frac{z_c M_{yc,Ed}}{I_{yc}} - \frac{y_c M_{zc,Ed}}{I_{zc}} \right]$$

$$F_{wy,Ed} = a \left[ \frac{N_{y,Ed}}{A_w} + \frac{x_c M_{zc,Ed}}{I_{zc}} - \frac{z_c M_{xc,Ed}}{I_{xc}} \right]$$

$$F_{wz,Ed} = a \left[ \frac{N_{z,Ed}}{A_w} + \frac{y_c M_{xc,Ed}}{I_{xc}} - \frac{x_c M_{yc,Ed}}{I_{yc}} \right]$$

Dans les expressions ci-dessus, l'aire résistante du cordon de soudure et les moments d'inertie par rapport aux axes principaux de l'assemblage soudé sont donnés ci-après :



Affaire n°		Feuille		3 sur 9		Rév B	
Nom Affaire <b>Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'INOX</b>							
Sujet <b>Exemple 5 – Assemblage soudé</b>							
Client		Rédigé par	IR	Date	Août 2002		
CECA		Vérfié par	FH/NB	Date	Oct. 2002		
		Révisé par	MEB	Date	Avril 2006		

$A_w = \int a dl = \sum a_i l_i$  pour une soudure composée d'éléments droits de longueurs  $l_i$  et de gorges  $a_i$ ,

$$I_{xc} = \int a(y_c^2 + z_c^2) dl$$

$$I_{yc} = \int a(x_c^2 + z_c^2) dl$$

$$I_{zc} = \int a(x_c^2 + y_c^2) dl$$

Comme la gorge  $a$  est constante tout le long de l'assemblage plan, on peut écrire :

$$\frac{A_w}{a} = \int dl = \sum l_i,$$

Comme  $x_c = 0$ ,

$$\frac{I_{zc}}{a} = \int (y_c^2) dl, \quad \frac{I_{yc}}{a} = \int (z_c^2) dl, \quad \frac{I_{xc}}{a} = \int (y_c^2 + z_c^2) dl = \frac{I_{yc}}{a} + \frac{I_{zc}}{a}$$

### Approches de calcul

Dans le cas présent, le calcul consiste en la détermination de la gorge requise au point critique.

Deux méthodes de calcul de soudures d'angles sont autorisées :

La première, dite *simplifiée* et plaçant en sécurité, est basée sur la résistance de calcul au cisaillement de la soudure d'angle. La sollicitation de calcul par unité de longueur de cordon est définie comme la somme vectoriel des sollicitations induites par les efforts et par les moments transmis par l'assemblage. Cette sollicitation de calcul par unité de longueur de cordon ne doit pas être supérieure à la résistance de calcul par unité de longueur de cordon prise comme la résistance de calcul de la soudure au cisaillement multipliée par la gorge  $a$ . Dans cette approche on ne prend pas en compte l'orientation du plan de la gorge par rapport à la direction de la sollicitation de calcul par unité de longueur de cordon.

La deuxième méthode est basée sur la comparaison de la résistance de calcul de base pour la soudure (à savoir la résistance en traction du matériau de la plus faible des parties assemblées) avec la contrainte de calcul appliquée dans la gorge qui est déterminée à l'aide d'une formule de type Von Mises. Cette méthode est la plus précise parce qu'elle prend en compte l'orientation du plan de la gorge par rapport à la direction de la sollicitation de calcul par l'unité de longueur de cordon.


#### 1. Détermination simplifiée de la résistance de calcul au cisaillement de la soudure

La vérification de la résistance de calcul pour la soudure d'angle se présente comme suit :

$$F_{w,Ed} = \sqrt{F_{wx,Ed}^2 + F_{wy,Ed}^2 + F_{wz,Ed}^2} \leq F_{w,Rd} = a f_{vw,d} = a \left( \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \right)$$

§ 6.4.2

EN 1993-1-8,  
Clause  
4.5.3.3

 <p><b>Centre Technique Industriel de la Construction Métallique</b></p> <p>102, Route de Limours F-78471 St Rémy Lès Chevreuse Cedex France Tel : +33 (0)1 30 85 25 00 Fax : +33 (0)1 30 52 75 38</p> <p><b>FEUILLE DE CALCUL</b></p>	Affaire n°	Feuille	4 sur 9	Rév	B
	Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'INOX			
	Sujet	<b>Exemple 5 – Assemblage soudé</b>			
	Client	Rédigé par	IR	Date	Août 2002
CECA	Vérfié par	FH/NB	Date	Oct. 2002	
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006	

où :

$f_{vw,d}$  est la résistance de calcul au cisaillement de la soudure

$F_{w,Rd}$  est la résistance de calcul au cisaillement, par unité de longueur, d'un cordon de soudure de gorge  $a$ .

Pour l'acier inoxydable,  $\beta_w$  peut être pris égal à 1,0

Lorsque la méthode de calcul se base sur la détermination de la gorge appropriée, l'expression de calcul devient :

$$a \geq \frac{F_{w,Ed}}{f_{vw,d}}$$

§ 6.4.2

## 2. Résistance de calcul de base pour la soudure

Dans cette méthode, il convient de vérifier la contrainte de type Von Mises dans la soudure par rapport à la résistance de calcul de base de la soudure (résistance en traction du matériau de la plus faible des parties assemblées). En général, l'approche exige que les contraintes,  $\sigma_{\perp}$ ,  $\tau_{\perp}$  et  $\tau_{||}$  dans la gorge soient déterminées, tenant compte ainsi de l'orientation du plan de l'aire de la gorge par rapport à l'orientation de la sollicitation résultante appliquée dans la soudure.

La formule de calcul est la suivante :

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

Éq. 6.12a

Il est aussi exigé de vérifier séparément la contrainte normale :

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

Éq. 6.12b

Pour le cas présent, d'un assemblage plan à soudure d'angle symétrique, cette vérification n'est pas critique. Cependant, elle peut l'être pour les soudures à pénétration partielle dans les assemblages chanfreinés.

Au lieu de calculer les contraintes ( $\sigma_{\perp}$ ,  $\tau_{\perp}$  et  $\tau_{||}$ ) dans la gorge de soudure, l'expression équivalente suivante peut être utilisée pour un assemblage dans le plan y-z avec une soudure d'angle symétrique :

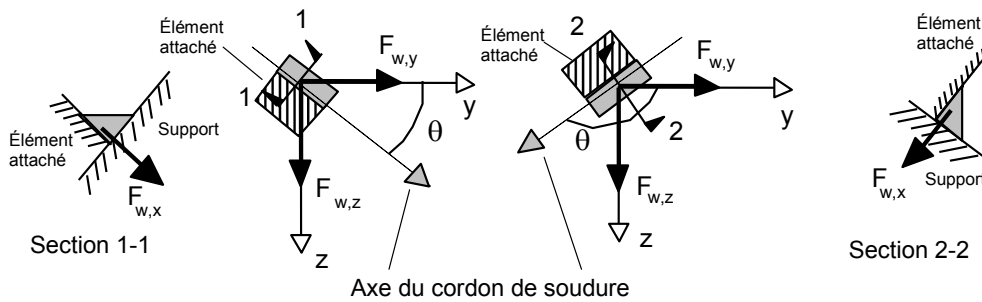
$$2F_{w,x}^2 + 2F_{w,y}^2 + 2F_{w,z}^2 + F_{w,y}^2 \cos^2 \theta + F_{w,z}^2 \sin^2 \theta - 2F_{w,x} F_{w,y} \sin \theta + 2F_{w,x} F_{w,z} \cos \theta + 2F_{w,y} F_{w,z} \sin \theta \cos \theta \leq \left( a \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \right)^2$$

*Note* : Des indices simplifiés sont utilisés :  $F_{w,x}$  pour  $F_{w,x,Ed}$  etc.

Dans la formule ci-dessus, l'angle  $\theta$  est celui entre l'axe y et l'axe du cordon, comme indiqué sur la figure suivante.



Affaire n°	Feuille	5 sur 9	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'INOX			
Sujet	<b>Exemple 5 – Assemblage soudé</b>			
Client CECA	Rédigé par	IR	Date	Août 2002
	Vérifié par	FH/NB	Date	Oct. 2002
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006



**Les composantes de sollicitation par unité de longueur de cordon au point critique de la soudure sont déterminées dans une annexe à la fin de cet exemple.**

**1. Calcul de la soudure en utilisant l'approche simplifiée de la résistance de calcul au cisaillement**

La résistance de calcul au cisaillement pour l'approche simplifiée est :

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2} \sqrt{3}} = \frac{530}{1,0 \times 1,25 \times \sqrt{3}} \approx 245 \text{ MPa}$$

La valeur de la sollicitation résultante par unité de longueur de cordon d'une gorge de 1 mm est :

$$F_{w,Ed} = \sqrt{F_{wx,Ed}^2 + F_{wy,Ed}^2 + F_{wz,Ed}^2} = \sqrt{243^2 + 747^2 + 966^2} = 1245 \text{ N/mm}$$

La dimension de gorge demandée est donc :

$$a \geq \frac{F_{w,Ed}}{f_{vw,d}} = \frac{1245}{245} \approx 5,0 \text{ mm}$$

**2. Calcul de la soudure en utilisant l'approche de la résistance de calcul de base**

La résistance de calcul de base de la soudure est :

$$\frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \times 530}{1,25} = 381,6 \text{ MPa}$$

où  $f_u$  est la résistance ultime en traction de la partie assemblée la moins résistante.

Au point (a), où l'angle  $\theta$  est égal à  $0^\circ$ , la formule de vérification devient :

$$2F_{wx,Ed}^2 + 3F_{wy,Ed}^2 + 2F_{wz,Ed}^2 + 2F_{wx,Ed}F_{wz,Ed} \leq \left( a \frac{f_u}{\gamma_{Mw}} \right)^2$$

La gorge nécessaire est donc :

EN 1993-1-8,  
Éq. 4.4

Éq. 6.12b



Affaire n°		Feuille	6 sur 9	Rév	B
Nom Affaire		Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'INOX			
Sujet		<b>Exemple 5 – Assemblage soudé</b>			
Client  CECA	Rédigé par	IR	Date	Août 2002	
	Vérfié par	FH/NB	Date	Oct. 2002	
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006	

$$a \geq \frac{\sqrt{2 \times (-243)^2 + 3 \times (747)^2 + 2 \times (966)^2 + 2 \times (-243) \times (966)}}{381,6} = 4,7 \text{ mm}$$

Ainsi, on adopte une gorge égale à 5 mm et on suppose qu'elle est de dimension constante sur toute la longueur.

Note :

Un facteur de réduction est exigé pour les couvre-joints lorsque la longueur effective totale de la soudure d'angle est supérieure à  $150 a$ . Le facteur de réduction semblerait moins approprié au type d'assemblage présenté ici. Cependant, en considérant, tout en se plaçant en sécurité, la longueur totale de la soudure avec la gorge de 5 mm, on obtient :

$$\beta_{LW.1} = 1,2 - 0,2L_j/(150a) = 1,2 - 0,2(600)/(150 \times 5) = 1,04$$

Prenons donc  $\beta_{LW.1} = 1,0$

On en conclut que l'utilisation d'un facteur de réduction pour la résistance de la soudure n'est pas exigée si la gorge de soudure de 5 mm est adoptée.

EN 1993-1-8,  
Éq. 4.9



Affaire n°	Feuille	7 sur 9	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'INOX			
Sujet	<b>Exemple 5 – Assemblage soudé</b>			
Client  CECA	Rédigé par	IR	Date	Août 2002
	Vérifié par	FH/NB	Date	Oct. 2002
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006

### **Annexe – Détermination de la soudure en utilisant l'approche de la résistance de calcul de base**

#### **Caractéristiques géométriques de l'assemblage soudé**

Il y a deux assemblages identiques, un de chaque côté du poteau, qui résistent aux efforts appliqués.

Seulement un des assemblages nécessite d'être étudié. Il est situé dans le plan y-z.

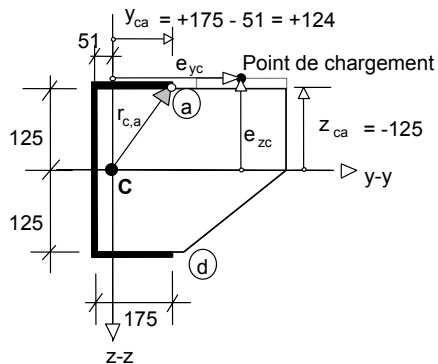
#### Aire de la gorge et positions du centre de gravité et du point critique

Considérons, l'assemblage composé de segments droits de longueurs  $L_i$  et de gorge  $a$  constante, l'aire de gorge (section résistante) de chaque assemblage, pour chaque millimètre de gorge, est :

$$\frac{A_w}{a} = \frac{a \int ds}{a} = \frac{\sum A_{w,i}}{a} = \frac{\sum aL_{w,i}}{a} = \sum L_i = (2 \times 175 + 250) = 600 \text{ mm}^2/\text{m}$$

La distance du centre de gravité de l'assemblage de gorge,  $a$ , constante par rapport à son bord vertical (parallèle à l'axe z) est donnée par :

$$\bar{y} = \frac{\sum \bar{y}_i (A_{w,i} / a)}{\sum A_{w,i} / a} = \frac{\sum \bar{y}_i L_i}{\sum L_i} = \frac{2 \times (87,5 \times 175) + (0 \times 250)}{600} \approx 51 \text{ mm}$$



Les coordonnées du point critique de l'assemblage, (a), par rapport aux axes principaux qui passent par le centre de gravité (C) sont :

$$y_{ca} = +(175 - 51) = +124 \text{ mm} \quad z_{ca} = -125 \text{ mm}$$

Note : le point (d) pourrait aussi être choisi comme point critique potentiel, ce qui donne :

$$y_{cd} = +(175 - 51) = +124 \text{ mm} \quad z_{cd} = +125 \text{ mm}$$

Cependant, pour le cas de charge considéré ici, il est évident que le point (a) est le plus critique.



Affaire n°	Feuille	8 sur 9	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'INOX			
Sujet	<b>Exemple 5 – Assemblage soudé</b>			
Client  CECA	Rédigé par	IR	Date	Août 2002
	Vérfié par	FH/NB	Date	Oct. 2002
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006

Moments d'inertie de la section résistante de l'assemblage

Pour chacun des assemblages, pour chaque millimètre de gorge :

$$\frac{I_{yc}}{a} = \int z_c^2 ds = 2 \times 175 \times 125^2 + 250^3 / 12 = 6,77 \times 10^6 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

$$\frac{I_{zc}}{a} = \int y_c^2 ds = 250 \times 51^2 + 2 \times 175^3 / 12 + 2 \times 175 \times (87,5 - 51)^2 = 210 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

Pour le moment de « torsion », le moment d'inertie par assemblage est :

$$I_{xc} = a \int r_c^2 ds = a \int y_c^2 ds + a \int z_c^2 ds = I_{zc} + I_{yc}$$

Donc :

$$\frac{I_{xc}}{a} = (6,77 + 2,01) \times 10^6 = 8,78 \times 10^6 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

Efforts et moments appliqués

Les efforts et les moments appliqués sont supposés répartis de façon uniforme sur les deux assemblages.

Les composantes d'efforts normaux et de cisaillement appliqués à chaque assemblage sont :

$$N_{x,Ed} = -\frac{20}{2} = -10 \text{ kN}, \quad N_{y,Ed} = +\frac{30}{2} = +15 \text{ kN},$$

$$N_{z,Ed} = +\frac{300}{2} = +150 \text{ kN}$$

Les moments sollicitants sont calculés en utilisant les composantes des efforts appliqués et leurs excentremets. Ces derniers, c'est-à-dire les coordonnées du point d'application de l'effort, sont :

$e_{xc} = 0$  car le point effectif d'application de l'effort est pris dans le plan y-z de l'assemblage,

$$e_{yc} = (300 - 100 + 175 - 51) = +324 \text{ mm},$$

$$e_{zc} = -140 \text{ mm}$$

Les moments appliqués, par assemblage, sont alors :

$$M_{xc,Ed} = e_{yc} N_{z,Ed} - e_{zc} N_{y,Ed} = (+324) \times (+150) - (-140) \times (+15) = +50,7 \text{ kN.m}$$

$$M_{yc,Ed} = e_{zc} N_{x,Ed} - e_{xc} N_{z,Ed} = (-140) \times (-10) - (0) \times (+150) = +1,4 \text{ kN.m}$$

$$M_{zc,Ed} = e_{xc} N_{y,Ed} - e_{yc} N_{x,Ed} = (0) \times (+15) - (+324) \times (-10) = +3,24 \text{ kN.m}$$

**Composantes de sollicitation au point critique de la soudure**

Pour l'assemblage dans le plan y-z, les composantes de sollicitation par unité de longueur de cordon de soudure au point (a) sont :





Affaire n°		Feuille		9 sur 9		Rév B	
Nom Affaire <b>Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'INOX</b>							
Sujet <b>Exemple 5 – Assemblage soudé</b>							
Client		Rédigé par	IR	Date	Août 2002		
CECA		Vérfié par	FH/NB	Date	Oct. 2002		
		Révisé par	MEB	Date	Avril 2006		

$$F_{wx,Ed} = \frac{N_{x,Ed}}{A_w / a} + \frac{z_{ca} M_{yc,Ed}}{I_{yc} / a} - \frac{y_{ca} M_{zc,Ed}}{I_{zc} / a}$$

$$F_{wy,Ed} = \frac{N_{y,Ed}}{A_w / a} - \frac{z_{ca} M_{xc,Ed}}{I_{xc} / a}$$

$$F_{wz,Ed} = \frac{N_{zc,Ed}}{A_w / a} + \frac{y_{ca} M_{xc,Ed}}{I_{xc} / a}$$

Les contributions des composantes de l'effort appliqué aux composantes de sollicitation par unité de longueur de cordon (dans tous les points de l'assemblage soudé) sont :

$$F_{w,x}^{N_x} = \frac{N_{x,Ed}}{A_w / a} = \frac{-10}{600} = -0,017 \text{ kN/mm}$$

$$F_{w,y}^{N_y} = \frac{N_{y,Ed}}{A_w / a} = \frac{+15}{600} = +0,025 \text{ kN/mm}$$

$$F_{w,z}^{N_z} = \frac{N_{z,Ed}}{A_w / a} = \frac{+150}{600} = +0,25 \text{ kN/mm}$$

Les différentes contributions des composantes du moment appliqué aux composantes d'efforts par unité de longueur de cordon au point (a) sont :

$$F_{w,y}^{M_{xc}} = -M_{xc,Ed} \frac{z_{c,a}}{(I_{xc} / a)} = -50,7 \times 10^6 \times \frac{(-125)}{8,78 \times 10^6} = +722 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,z}^{M_{xc}} = +M_{xc,Ed} \frac{y_{c,a}}{(I_{xc} / a)} = +50,7 \times 10^6 \times \frac{(+124)}{8,78 \times 10^6} = +716 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,x}^{M_{yc}} = +M_{yc,Ed} \frac{z_{c,a}}{(I_{yc} / a)} = +1,41 \times 10^6 \times \frac{(-125)}{6,77 \times 10^6} = -26 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,x}^{M_{zc}} = -M_{zc,Ed} \frac{y_{c,a}}{(I_{zc} / a)} = -3,24 \times 10^6 \times \frac{(+124)}{2,01 \times 10^6} = -200 \text{ N/mm}$$

En combinant les contributions des efforts et des moments selon les composantes de sollicitation au point (a) par unité de longueur du cordon, on obtient :

$$F_{wx,Ed} = F_{w,x}^{N_x} + F_{w,x}^{M_{yc}} + F_{w,x}^{M_{zc}} = -17 -26 -200 = -243 \text{ N/mm}$$

$$F_{wy,Ed} = F_{w,y}^{N_y} + F_{w,y}^{M_{xc}} = +25 +722 = +747 \text{ N/mm}$$

$$F_{wz,Ed} = F_{w,z}^{N_z} + F_{w,z}^{M_{xc}} = +250 +716 = +966 \text{ N/mm}$$

Ces composantes de sollicitation par unité de longueur de cordon sont données pour une gorge de 1 mm sur toute la longueur effective de l'assemblage soudé.

