



Affaire n°	Feuille	1 sur 8	Rév	A
Nom Affaire Projet de Valorisation RFCS : Utilisation de l'Inox				
Sujet Exemple 12 – Calcul d'une section en C à bords tombés				
Client	Rédigé par	ER/EM	Date	Fév. 2006
RFCS	Vérifié par	HB	Date	Mars 2006

EXEMPLE DE CALCUL N°12 – CALCUL D'UNE SECTION EN C À BORDS TOMBÉS

Dimensionner une poutre sur appuis simples de section transversale en C à bords tombés dans un plancher exposé. Le matériau est un acier inoxydable de nuance 1.4401 CP500, c'est-à-dire formé à froid avec une limite d'élasticité de 500 MPa. La poutre est simplement appuyée avec une portée l de 4 m. L'espacement entre deux poutres adjacentes est de 1 m.

Comme la charge n'est pas appliquée au centre de cisaillement de la section en C, il est nécessaire de vérifier l'interaction entre la résistance à la torsion de la section transversale et la résistance au déversement de la barre. Dans cet exemple, cependant, on ne vérifie que la résistance au déversement de la barre.

Coefficients

Coefficients partiels : $\gamma_{M0} = 1,1$ et $\gamma_{M1} = 1,1$

Coefficients partiels pour actions : $\gamma_G = 1,35$ (charges permanentes) et $\gamma_Q = 1,5$ (charges variables)

Actions

Actions permanentes (G) : 2 kN/m^2

Actions variables (Q) : 3 kN/m^2

Cas de chargement à considérer à l'état limite ultime :

$$q^* = \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} = 7,2 \text{ kN/m}$$

Analyse structurale

Réactions d'appuis (effort tranchant de calcul)

$$V_{Ed} = \frac{q^* \times 4}{2} = 14,4 \text{ kN}$$

Moment fléchissant de calcul

$$M_{Ed} = \frac{q^* \times 4^2}{8} = 14,4 \text{ kNm}$$

Caractéristiques de matériau

Limite d'élasticité $f_y = 500 \text{ MPa}$

Module d'élasticité $E = 200\,000 \text{ MPa}$

Module de cisaillement $G = 76900 \text{ MPa}$

Caractéristiques de la section transversale

L'influence des angles arrondis sur la résistance de la section transversale peut être négligée si le rayon interne $r \leq 5t$ et $r \leq 0,10b_p$ et la section transversale peut être supposée être constituée de parois planes avec des angles vifs. Pour les propriétés de rigidité de la section transversale, il convient de toujours prendre en compte l'influence des angles arrondis.

Tableau 2.1
§ 2.3.2

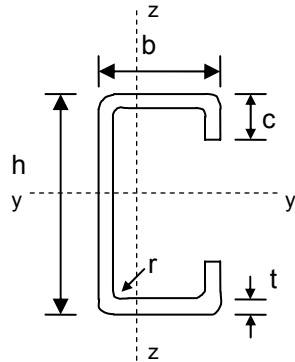
Éq. 2.3

Tableau 3.5
§ 3.2.4
§ 3.2.4

§ 4.6.2



Affaire n°	Feuille	2 sur 8	Rév	A
Nom Affaire	Projet de Valorisation RFCS : Utilisation de l'Inox			
Sujet	Exemple 12 – Calcul d'une section en C à bords tombés			
Client	Rédigé par	ER/EM	Date	Fév. 2006
RFCS	Vérfié par	HB	Date	Mars 2006



$$\begin{aligned} h &= 160 \text{ mm} \\ b &= 125 \text{ mm} \\ c &= 30 \text{ mm} \\ t &= 5 \text{ mm} \\ r &= 5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$b_p = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m [\tan(\phi/2) - \sin(\phi/2)] = 2,2 \text{ mm}$$

$$r_m = r + t/2 = 7,5 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm} \leq 5t = 25 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm} \leq 0,10b_p = 11,56 \text{ mm}$$

L'influence des angles arrondis sur les caractéristiques de section peut être prise en compte, avec une précision suffisante, en réduisant les caractéristiques calculées pour une section transversale similaire comportant des angles vifs, en utilisant les approximations suivantes :

Largueur plane théorique de la semelle, $b_{p,f} = b - t - 2g_r = 115,61 \text{ mm}$

Largueur plane théorique de l'âme, $b_{p,w} = h - t - 2g_r = 150,61 \text{ mm}$

Largueur plane théorique du raidisseur de bord, $b_{p,l} = c - t/2 - g_r = 25,30 \text{ mm}$

$$A_{g,sh} = 2162 \text{ mm}^2$$

$$I_{y,sh} = 9,069 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} = 0,02$$

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) = 2119 \text{ mm}^2$$

$$I_g = I_{g,sh} (1 - 2\delta) = 8,708 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Classification de la section transversale

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5} = 0,669$$

Semelle : Parois internes comprimées. Partie soumise à la compression.

$$c = b_p = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$$

$c/t = 23,12 > 30,7 \varepsilon$, par conséquent, les semelles sont de Classe 4

Figure 4.5

Éq. 4.21

Éq. 4.18

Éq. 4.19

§ 4.3

Tableau 4.2



Affaire n°	Feuille	3 sur 8	Rév	A
Nom Affaire	Projet de Valorisation RFCS : Utilisation de l'Inox			
Sujet	Exemple 12 – Calcul d'une section en C à bords tombés			
Client	Rédigé par	ER/EM	Date	Fév. 2006
RFCS	Vérfié par	HB	Date	Mars 2006

Âme : Parois internes comprimées. Partie soumise à la flexion.

$$c = h - t - 2g_r = 150,6 \text{ mm}$$

$c/t = 30,12 \leq 56 \epsilon$, par conséquent, l'âme est de Classe 1

Raidisseur de bord : Parois comprimées en console. Partie soumise à la compression, raidisseur comprimé,

$$c = c - t/2 - g_r = 25,30 \text{ mm}$$

$c/t = 5,06 \leq 10 \epsilon$, par conséquent, le raidisseur est de Classe 1

Calcul des caractéristiques de la section efficace

Largeur efficace de la semelle : Parois internes comprimées. Partie soumise à la compression.

$$\bar{b} = b_p = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$$

En supposant une distribution uniforme de contraintes dans la semelle comprimée :

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1 \text{ et le coefficient de voilement } k_\sigma = 4$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = 0,608$$

$$\text{Parois internes formées à froid : } \rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} = 0,9311 < 1$$

$$b_{\text{eff}} = \rho \bar{b} = 107,64 \text{ mm}, \quad b_{e1} = 0,5b_{\text{eff}} = 53,82 \text{ mm}, \quad b_{e2} = 0,5b_{\text{eff}} = 53,82 \text{ mm}$$

Effets du traînage de cisaillement

L'effet du traînage de cisaillement dans les semelles peut être négligé si $b_0 < L_e/50$, où b_0 est la largeur d'une semelle en console ou la demi-largeur d'une paroi interne et L_e est la longueur entre points de moments nuls.

$$\text{Pour les parois internes : } b_0 = (b-t)/2 = 60 \text{ mm}$$

$$\text{Longueur entre les points de moments nuls : } L_e = 4000 \text{ mm}, \quad L_e/50 = 80 \text{ mm}$$

Par conséquent, l'effet de traînage de cisaillement peut être négligé.

Déformation transversale des semelles

$$u = 2 \frac{\sigma_a^2 b_s^4}{E^2 t^2 z} = 2,55 \text{ mm} \quad (\text{flexion de la semelle en direction de l'axe neutre})$$

$b_s = 141 \text{ mm}$ est la largeur de la partie de la semelle sortant de l'âme

$$t = 5 \text{ mm}$$

$z = 77,5 \text{ mm}$ est la distance entre la semelle prise en considération et l'axe neutre

σ_a est la contrainte moyenne exercée sur les semelles, calculée avec la section brute (on suppose $f_y = 500 \text{ MPa}$).

La déformation transversale des semelles peut être négligée si u inférieur à 5% de la

§ 4.4.1

Tableau 4.3

Éq. 4.2

§ 4.4.2

§ 4.4.3

prEN 1993-1-3, Clause 5.4

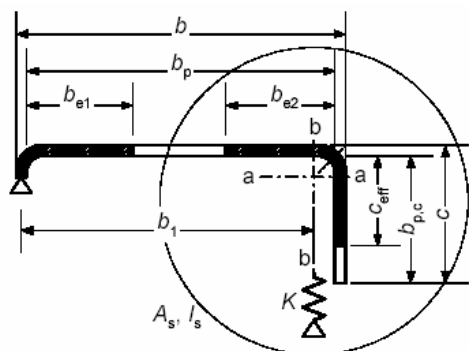


Affaire n°	Feuille	4 sur 8	Rév	A
Nom Affaire		Projet de Valorisation RFCS : Utilisation de l'Inox		
Sujet		Exemple 12 – Calcul d'une section en C à bords tombés		
Client	Rédigé par	ER/EM	Date	Fév. 2006
RFCS	Vérfié par	HB	Date	Mars 2006

hauteur de section :

$u = 2,55 \text{ mm} < 0,05h = 8 \text{ mm}$, par conséquent, la déformation transversale des semelles peut être négligée.

Parois raidies. Raidisseurs de bord
Flambement par distorsion. Parois planes avec raidisseurs de bord



$$b/t \leq 60$$

a) raidisseur de bord à simple pli

Étape 1 : Section transversale efficace initiale du raidisseur

Pour les semelles (comme calculé ci-dessus)

$$b = 125 \text{ mm}$$

$$b_p = 115,61 \text{ mm}$$

$$b_{eff} = 107,65 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,5b_{eff} = 53,82 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,5b_{eff} = 53,82 \text{ mm}$$

Pour le raidisseur, la largeur efficace c_{eff} doit être calculée en utilisant le coefficient de voilement correspondant k_σ , $\bar{\lambda}_p$ et ρ donnés par les expressions suivantes :

$$b_{p,c} = c - t/2 - g_r = 25,30 \text{ mm}$$

$$b_p = 115,6 \text{ mm}$$

$$b_{p,c}/b_p = 0,22 < 0,35 \quad \text{alors :} \quad k_\sigma = 0,5$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = 0,45 \quad (\bar{b} = 30 \text{ mm})$$

$$\text{Les parois en console formées à froid : } \rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2} = 1,08 > 1 \quad \text{alors : } \rho = 1$$

$$c_{eff} = \rho b_{p,c} = 25,30 \text{ mm}$$

Étape 2 : Coefficient de réduction pour le flambement par distorsion

Calcul des caractéristiques géométriques de la section efficace du raidisseur de bord

$$b_{e2} = 53,82 \text{ mm}$$

$$c_{eff} = 25,30 \text{ mm}$$

§ 4.5.1
et prEN
1993-1-3,
Clause 5.5.3

prEN 1993-1-3,
Clause
5.5.3.2

prEN 1993-1-3,
Éq. 5.13b

Éq. 4.2

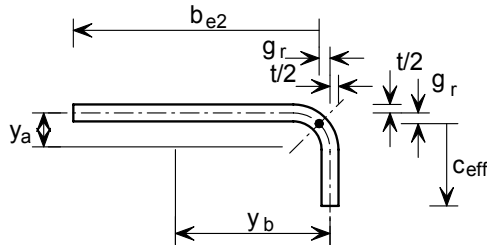
Éq. 4.1b

prEN 1993-1-3,
Éq. 5.13a



Affaire n°	Feuille	5 sur 8	Rév	A
Nom Affaire	Projet de Valorisation RFCS : Utilisation de l'Inox			
Sujet	Exemple 12 – Calcul d'une section en C à bords tombés			
Client	Rédigé par	ER/EM	Date	Fév. 2006
RFCS	Vérfié par	HB	Date	Mars 2006

$$A_s = (b_{e2} + c_{eff})t = 395,64 \text{ mm}^2$$



$$y_a = 4,01 \text{ mm}$$

$$y_b = 18,27 \text{ mm}$$

$$I_s = 21211,8 \text{ mm}^4$$

Calcul de la rigidité du support élastique par unité de longueur

$$K_1 = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5b_1 b_2 h_w k_f} = 2,487 \text{ MPa}$$

$b_1 = b - y_b - t/2 = 104,23 \text{ mm}$ (distance entre la jonction âme-semelle et le centre de gravité de l'aire efficace du raidisseur de bord, incluant la partie efficace de la semelle b_{e2})

$k_f = 0$ (semelle 2 tendue)

$h_w = 150 \text{ mm}$ est la hauteur de l'âme

Contrainte critique de flambement élastique pour la section efficace du raidisseur de bord

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} = 519,195 \text{ N/mm}^2$$

Coefficient de réduction χ_d pour le flambement par distorsion

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb} / \sigma_{cr,s}} = 0,98$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad \text{then} \quad \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 0,76$$

L'aire et l'épaisseur réduites de la section efficace du raidisseur

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} = 300,88 \text{ mm}^2$$

$$t_{red} = t A_{s,red} / A_s = 3,8 \text{ mm}$$

Le calcul des propriétés de la section efficace avec prise en compte de l'effet du flambement par distorsion donne :

$$A_{eff,sh} = 2028 \text{ mm}^2$$

$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} = 0,02$$

$$A_{eff} = A_{eff,sh} (1 - \delta) = 1987 \text{ mm}^2$$

prEN 1993-1-3, Fig. 5.9

prEN 1993-1-3, Éq. 5.10b

prEN 1993-1-3, Éq. 5.15

prEN 1993-1-3, Éq. 5.12d

prEN 1993-1-3, Éq. 5.17

Éq. 4.21

Éq. 4.18



Affaire n°	Feuille	6 sur 8	Rév	A
Nom Affaire		Projet de Valorisation RFCS : Utilisation de l'Inox		
Sujet		Exemple 12 – Calcul d'une section en C à bords tombés		
Client	Rédigé par	ER/EM	Date	Fév. 2006
RFCS	Véifié par	HB	Date	Mars 2006

$z_G = 68,98$ mm (distance entre la fibre inférieure et l'axe neutre)

$$I_{y,eff,sh} = 8,274 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{y,eff} = I_{y,eff,sh} (1 - 2\delta) = 7,943 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{y,eff, sup} = 92,34 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,eff, inf} = 115,2 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Éq. 4.19

Résistance de la section transversale

§ 4.7

Résistance de la section transversale à la flexion

§ 4.7.4

$$M_{c,Rd} = W_{y,eff,min} f_y / \gamma_{M0} = 41,97 \text{ kNm}$$
 pour la section transversale de Classe 4

Éq. 4.29

Moment sollicitant de calcul : $M_{Ed} = 14,4$ kNm

La résistance de la section transversale est ainsi vérifiée.

Résistance de la section transversale à l'effort tranchant

§ 4.7.5

$$V_{pl,Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 209,95 \text{ kN}$$

Éq. 4.30

$A_v = 800 \text{ mm}^2$ est l'aire résistante à l'effort tranchant

L'effort tranchant sollicitant de calcul : $V_{Ed} = 14,4$ kN

La résistance de la section à l'effort tranchant est ainsi vérifiée.

Résistance de la section transversale à une sollicitation combinée

§ 4.7.6

$$V_{Ed} = 14,4 \text{ kN} < 0,5 V_{pl,Rd} = 104,97 \text{ kN}$$

Il n'y a pas d'interaction entre le moment fléchissant et l'effort tranchant.

Vérification de l'élément de poutre en flexion

§ 5.4

Résistance au déversement

§ 5.4.2

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{y,eff,sup} f_y / \gamma_{M1}$$
 pour la section transversale de Classe 4

Éq. 5.8

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + [\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1$$

Éq. 5.9

$$\varphi_{LT} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right)$$

Éq. 5.10

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,eff} f_y}{M_{cr}}}$$

Éq. 5.11

$\alpha_{LT} = 0,34$ pour des sections formées à froid

Calcul du moment critique au déversement de la poutre



Affaire n°	Feuille	7 sur 8	Rév	A
Nom Affaire	Projet de Valorisation RFCS : Utilisation de l'Inox			
Sujet	Exemple 12 – Calcul d'une section en C à bords tombés			
Client	Rédigé par	ER/EM	Date	Fév. 2006
RFCS	Vérifié par	HB	Date	Mars 2006

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left(\left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]^{1/2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right)$$

Annexe B,
§ B.1

Pour une poutre simplement appuyée soumise à une charge uniformément répartie : $C_1 = 1,12$, $C_2 = 0,45$ et $C_3 = 0,525$.

On considère des conditions normales de maintien à chaque extrémité : $k_z = k_w = 1$

$z_j = 0$ pour une section transversale à semelles égales

$z_g = z_a - z_s = h/2 = 80 \text{ mm}$

z_a est la position du point d'application de la charge

z_s est la position du centre de cisaillement

$y_G = 45,34 \text{ mm}$ (distance entre l'axe de l'âme et le centre de gravité)

$I_{z,sh} = 4,274 \times 10^6 \text{ mm}^4$

$I_{t,sh} = 18,02 \times 10^3 \text{ mm}^4$

$I_{w,sh} = 23,19 \times 10^9 \text{ mm}^6$

$I_z = I_{z,sh} (1 - 2\delta) = 4,103 \times 10^6 \text{ mm}^4$

$I_t = I_{t,sh} (1 - 2\delta) = 17,30 \times 10^3 \text{ mm}^4$

$I_w = I_{w,sh} (1 - 4\delta) = 21,33 \times 10^9 \text{ mm}^6$

Note : L'expression utilisée pour déterminer la torsion non uniforme est obtenue à partir de Wei-Wen You, "Cold-Formed Steel Design", Annexe B-Torsion

$$\text{Alors, } M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left(\left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]^{1/2} - (C_2 z_g) \right) = 33,74 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,eff,sup} f_y}{M_{cr}}} = 1,17 \quad (W_{y,eff,sup} = 92,39 \times 10^3 \text{ mm}^3, \text{ semelle comprimée})$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) = 1,315$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \left[\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]^{0,5}} = 0,522$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{y,eff,sup} f_y / \gamma_{M1} = 21,91 \text{ kNm}$$

Moment sollicitant de calcul : $M_{Ed} = 14,4 \text{ kNm}$.

Par conséquent, la résistance au déversement est vérifiée.

Note : comme la charge n'est pas appliquée au centre de cisaillement de la section en C, il est aussi nécessaire de vérifier l'interaction entre la résistance de la section transversale à la torsion et la résistance de la poutre au déversement.

Résistance au voilement par cisaillement

§ 5.4.3

La résistance au voilement par cisaillement est à vérifier, pour une âme non raidie, seulement si : $h_w / t \geq 52\epsilon / \eta$.



FEUILLE DE CALCUL

Affaire n°	Feuille	8 sur 8	Rév	A
Nom Affaire	Projet de Valorisation RFCS : Utilisation de l'Inox			
Sujet	Exemple 12 – Calcul d'une section en C à bords tombés			
Client	Rédigé par	ER/EM	Date	Fév. 2006
RFCS	Vérifié par	HB	Date	Mars 2006

La valeur recommandée pour $\eta = 1,20$

$$h_w / t = 28 \text{ et } 52\varepsilon/\eta = 28,99$$

Ainsi, aucune vérification supplémentaire n'est nécessaire.