



Affaire n°	OSM 466	Page	2 sur 8	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	Exemple 10 – Résistance au feu d'un poteau comprimé et fléchi				
Client CECA	Rédigé par	SMH	Date	Août 2001	
	Vérfié par	NRB	Date	Nov. 2001	
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006	

LC1 (état limite ultime)
$$\sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}$$

$\gamma_{G,j} = 1,35$ (effets défavorables)

$\gamma_{Q,1} = 1,5$

LC2 (état limite d'incendie)
$$\sum_j \gamma_{GA,j} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1}$$

$\gamma_{GA} = 1,0$

Des valeurs de $\psi_{1,1}$ sont données dans l'EN 1990 et ses Annexes Nationales associées mais, en se plaçant en sécurité, on supposera pour cet exemple que $\psi_{1,1} = 1,0$

Calcul à l'état limite ultime (LC1)

Charge dans le poteau résultant de l'effort tranchant à l'extrémité de la poutre (LC1) :

Effort axial $N_{Ed} = 1,35 \times 6 + 1,5 \times 7 = 18,6$ kN

Prenons une section creuse rectangulaire 100x50x6

Moment fléchissant selon l'axe fort (dû à l'excentricité de la charge par rapport au centre de gravité de la section du poteau), $M_{y,Ed} = 18,6 \times (0,09 + 0,10/2) = 2,60$ kN.m

Caractéristiques du matériau

L'acier inoxydable est de nuance 1.4401

Limite d'élasticité conventionnelle à 0,2% = 220 MPa et $f_u = 530$ MPa

Prenons $f_y = 220$ MPa

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

Caractéristiques de la section d'un tube rectangulaire 100x50x6

$W_{el,y} = 32,58 \times 10^3$ mm³ $i_y = 32,9$ mm

$W_{pl,y} = 43,75 \times 10^3$ mm³ $i_z = 19,1$ mm

$A_g = 1500$ mm² $t = 6$ mm

Classification de la section transversale

$\varepsilon = 1,01$

Supposons, en se plaçant en sécurité, que pour l'âme $c = h - 2t = 100 - 12 = 88$ mm

Âmes comprimées : $\frac{c}{t} = \frac{88}{6} = 14,7$

Pour la Classe 1, $\frac{c}{t} \leq 25,7\varepsilon = 25,96$. L'âme est donc de Classe 1

Éq. 2.3

§ 2.3.2

Tableau 3.1

§ 3.2.4

§ 3.2.4

Tableau 4.2

Tableau 4.2



Affaire n°	OSM 466	Page	3 sur 8	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	Exemple 10 – Résistance au feu d'un poteau comprimé et fléchi				
Client CECA	Rédigé par	SMH	Date	Août 2001	
	Vérifié par	NRB	Date	Nov. 2001	
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006	

Une analyse plus précise montre que si l'âme est de Classe 1 lorsqu'elle est comprimée, alors la semelle est aussi de Classe 1. La section transversale est donc de Classe 1.

Coefficients partiels

Les coefficients partiels suivants sont utilisés tout au long de cet exemple pour le calcul à l'état limite LC1 :

$$\gamma_{M0} = 1,1$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

Résistance au flambement en compression axiale

Résistance au flambement par flexion par rapport à l'axe z-z :

$$N_{b,z,Rd} = \frac{\chi_z A_g f_y}{\gamma_{M1}} \text{ pour des sections transversales de Classes 1, 2 et 3}$$

$$\chi = \text{coefficient de réduction pour le flambement} = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1$$

$$\varphi = 0,5 (1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_z} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$$

L_{cr} = longueur de flambement du poteau, prise en se plaçant du côté de la sécurité égale à $1,0 \times$ longueur du poteau = 2,7 m

$$\bar{\lambda}_z = \frac{2700}{19,1} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{220}{200000}} = 1,492$$

Pour les sections creuses soumises au flambement par flexion, $\alpha = 0,49$ et

$$\bar{\lambda}_0 = 0,40$$

$$\varphi = 0,5 (1 + 0,49(1,492 - 0,4) + 1,492^2) = 1,881$$

$$\chi_z = \frac{1}{1,881 + [1,881^2 - 1,492^2]^{0,5}} \leq 1$$

$$\chi_z = 0,3305$$

$$N_{b,z,Rd} = \frac{0,3305 \times 1500 \times 220}{1,1} = 99,15 \text{ kN}$$

(La résistance au flambement par torsion n'est pas critique pour une section rectangulaire creuse avec un rapport h/b égal à 2.)

$N_{Ed} = 18,6 \text{ kN}$. La résistance du poteau au flambement est donc satisfaisante.

Tableau 2.1

§ 5.3.3

Éq. 5.2a

Éq. 5.3

Éq. 5.4

Éq. 5.5a

Tableau 5.1

§ 5.3.1



Affaire n°	OSM 466	Page	4 sur 8	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	Exemple 10 – Résistance au feu d'un poteau comprimé et fléchi				
Client CECA	Rédigé par	SMH	Date	Août 2001	
	Vérfié par	NRB	Date	Nov. 2001	
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006	

Résistance à la flexion composée

Vérification de la résistance de la section transversale pour l'interaction M & N

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{c,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{M_{c,z,Rd}} \leq 1$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1500 \times 220}{1,1} = 300 \text{ kN}$$

$$e_{Ny} = e_{Nz} = 0$$

$$M_{z,Ed} = 0$$

$$M_{c,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{43,75 \times 10^3 \times 220}{1,1} = 8,75 \text{ kN.m}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{c,y,Rd}} = \frac{18,6}{300} + \frac{2,60}{8,75} = 0,062 + 0,297 = 0,359 < 1,00$$

La résistance de la section transversale est donc satisfaisante.

§ 4.7.6
prEN 1993-1-3, Clause 6.1.9
Éq. 4.25

Éq. 4.27

Vérification de la résistance au flambement en flexion composée

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1$$

$\beta_{W,y} = 1,0$ pour les sections transversales de Classe 1

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \text{ mais } 1,2 \leq k_y \leq 1,2 + 2 \left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \right)$$

Déterminons $N_{b,Rd,y}$ en utilisant la même méthode que celle utilisée pour calculer $N_{b,Rd,z}$ en page 3.

Pour les sections creuses susceptibles de présenter un flambement par flexion, $\alpha = 0,49$ et $\bar{\lambda}_0 = 0,40$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr}}{i_y} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{2700}{32,9} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{220}{200000}} = 0,866$$

$$\varphi = 0,5 \left(1 + 0,49(0,866 - 0,4) + 0,866^2 \right) = 0,989$$

$$\chi_y = \frac{1}{0,989 + [0,989^2 - 0,866^2]^{0,5}} \leq 1$$

$$\chi_y = 0,682 < 1,0$$

$$N_{b,Rd,y} = \frac{0,682 \times 1500 \times 220}{1,1} = 204,6 \text{ kN}$$

§ 5.5.2

Éq. 5.40

Tableau 5.1



**The Steel
Construction
Institute**

Silwood Park, Ascot, Berks SL5 7QN
Telephone : (01344) 623345
Fax : (01344) 622944

FEUILLE DE CALCUL

Affaire n°	OSM 466	Page	5 sur 8	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	Exemple 10 – Résistance au feu d'un poteau comprimé et fléchi				
Client CECA	Rédigé par	SMH	Date	Août 2001	
	Vérfié par	NRB	Date	Nov. 2001	
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006	

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}}$$

$$k_y = 1,0 + 2(0,866 - 0,5) \frac{18,6}{204,6} = 1,07 < 1,2$$

Par conséquent, $k_y = 1,2$

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{w,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right)$$

$$\frac{18,6}{99,15} + 1,2 \left(\frac{2,60 \times 10^6 + 0}{1,0 \times 43,75 \times 10^3 \times 220 / 1,1} \right) = 0,188 + 0,297 = 0,485 < 1,0$$

La barre en flexion composée est donc satisfaisante pour l'état limite ultime LC1.

Vérification à l'état limite d'incendie (LC2)

A l'état limite d'incendie LC2, le poteau est vérifié sous les actions suivantes :

Effort axial de compression, $N_{fi,Ed} = 1,0 \times 6 + 1,0 \times 7 = 13,0$ kN

Moment fléchissant maximum $M_{y,fi,Ed} = 13,0 \times (0,09 + 0,05) = 1,82$ kN.m

Détermination de la température dans l'acier après une durée d'exposition à l'incendie de 30 minutes

§ 7.4.7

Supposons que la section est non protégée et que la distribution de température est uniforme à l'intérieur de la section. L'augmentation de température pendant un intervalle de temps Δt est donnée par la relation suivante :

$$\Delta \theta_{a,t} = \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t$$

Éq. 7.34

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$$

Éq. 7.35

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_a)$$

Éq. 7.36

où :

θ_g = température des gaz à proximité de la barre exposée au feu, donnée par la courbe d'incendie normalisée:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

Éq. 7.38

θ_a = température à la surface de la barre

$$\dot{h}_{net,r} = \varphi \varepsilon_{res} 5,67 \times 10^{-8} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4]$$

Éq. 7.37

Les données initiales pour la détermination de la température finale de l'acier sont les suivantes :



FEUILLE DE CALCUL

Affaire n°	OSM 466	Page	6 sur 8	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	Exemple 10 – Résistance au feu d'un poteau comprimé et fléchi				
Client CECA	Rédigé par	SMH	Date	Août 2001	
	Vérfié par	NRB	Date	Nov. 2001	
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006	

$$A_m/V = 200 \text{ m}^{-1}$$

$$\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Température initiale de l'acier, $\theta_a = 20^\circ\text{C}$

Émissivité résultante, $\epsilon_{res} = 0,2$

Masse volumique de l'acier inoxydable, $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$

Facteur de forme, $\varphi = 1,0$

La chaleur spécifique dépend de la température ; elle est donnée par l'expression suivante :

$$c_a = 450 + 0,28\theta_a - 2,91 \times 10^{-4}\theta_a^2 + 1,34 \times 10^{-7}\theta_a^3 \text{ J/kgK}$$

$$\Delta t = 2 \text{ secondes}$$

Les expressions ci-dessus et les données initiales ont été introduites dans une feuille de calcul EXCEL et, après une durée d'exposition à l'incendie de 30 minutes, la température suivante de l'acier a été obtenue :

$$\theta_a = 811^\circ\text{C}$$

Éq. 7.4

Réduction des caractéristiques mécaniques aux températures élevées

Les facteurs de réduction nécessaires pour le calcul de la résistance aux températures élevées sont les suivants :

Facteur de réduction du module d'élasticité $k_{E, \theta} = E_\theta/E$

Facteur de réduction de la limite d'élasticité à 0,2 % $k_{0,2\text{proof}, \theta} = f_{0,2\text{proof}, \theta}/f_y$

Facteur de réduction de la résistance ultime à la traction $k_{u, \theta} = f_{u, \theta}/f_u$

La valeur de la limite d'élasticité à 2 % aux températures élevées est également nécessaire pour effectuer les calculs de résistance. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$f_{2, \theta} = f_{0,2\text{proof}, \theta} + g_{2, \theta} (f_{u, \theta} - f_{0,2\text{proof}, \theta})$$

Éq. 7.1

Les valeurs de facteurs de réduction à 811°C sont obtenues par interpolation linéaire.

Tableau 7.1

$$k_{0,2\text{proof}, \theta} = 0,377$$

$$k_{u, \theta} = 0,322$$

$$k_{E, \theta} = 0,610$$

$$g_{2\theta} = 0,353$$

d'où :

$$f_{2, \theta} = 0,377 \times 220 + 0,353 \times (0,322 \times 530 - 0,377 \times 220)$$

$$= 113,9 \text{ MPa}$$

$$k_{2, \theta} = 113,9/220 = 0,518$$

Coefficient partiel

$$\gamma_{M, fi} = 1,0$$

§ 7.1



Affaire n°	OSM 466	Page	7 sur 8	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	Exemple 10 – Résistance au feu d'un poteau comprimé et fléchi				
Client CECA	Rédigé par	SMH	Date	Août 2001	
	Vérifié par	NRB	Date	Nov. 2001	
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006	

Résistance au flambement

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{z,fi} A_g k_{0,2proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi}$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \text{ mais } \leq 1,0$$

$$\varphi_\theta = 0,5 \left(1 + \alpha (\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_\theta^2 \right)$$

$$\bar{\lambda}_{z,\theta} = \bar{\lambda}_z [k_{0,2proof,\theta} / k_{E,\theta}]^{0,5} = 1,492 \times (0,377/0,610)^{0,5} = 1,173$$

Pour le flambement par flexion d'un profil creux, $\alpha = 0,49$ et $\bar{\lambda}_0 = 0,4$

$$\varphi_{z,\theta} = 0,5 \left(1 + 0,49(1,173 - 0,4) + 1,173^2 \right) = 1,377$$

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{1,377 + \sqrt{1,377^2 - 1,173^2}} = 0,477$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = 0,477 \times 1500 \times 0,377 \times 220/1,0 = 59,3 \text{ kN}$$

$N_{fi,Ed} = 13,0 \text{ kN}$, la résistance du poteau au flambement est satisfaisante.

§ 7.4.3

Éq. 7.8

Éq. 7.10

Éq. 7.11

Éq. 7.12

Tableau 5.1

Flexion composée

Pour une section transversale de Classe 1, l'expression suivante doit être satisfaite :

$$\frac{N_{fi,Ed}}{A_g k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1$$

Éq. 7.24

dans laquelle :

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A_g k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3$$

Éq. 7.28

$$\mu_y = (1,2\beta_{M,y} - 3)\bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44\beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8$$

Éq. 7.29

$$\bar{\lambda}_y = 0,866$$

Page 4

$$\bar{\lambda}_{y,\theta} = \bar{\lambda}_y [k_{0,2proof,\theta} / k_{E,\theta}]^{0,5} = 0,866 \times (0,377/0,610)^{0,5} = 0,681$$

Éq. 7.12

En supposant le poteau encasté en pied, la distribution du moment fléchissant est triangulaire et $\beta_M = 1,8$

Tableau 7.3

$$\begin{aligned} \mu_y &= (1,2 \times 1,8 - 3) \times 0,681 + 0,44 \times 1,8 - 0,29 \\ &= -0,070 \end{aligned}$$

$$\varphi_{y,\theta} = 0,5 \left(1 + 0,49(0,681 - 0,4) + 0,681^2 \right) = 0,801$$

$$\chi_{y,fi} = \frac{1}{0,801 + \sqrt{0,801^2 - 0,681^2}} = 0,818$$



**The Steel
Construction
Institute**

Silwood Park, Ascot, Berks SL5 7QN
Telephone : (01344) 623345
Fax : (01344) 622944

FEUILLE DE CALCUL

Affaire n°	OSM 466	Page	8 sur 8	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	Exemple 10 – Résistance au feu d'un poteau comprimé et fléchi				
Client CECA	Rédigé par	SMH	Date	Août 2001	
	Vérifié par	NRB	Date	Nov. 2001	
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006	

$$k_y = 1 - \frac{(-0,07) \times 13,0 \times 10^3}{0,818 \times 1500 \times 0,377 \times \frac{220}{1,00}} = 1,009 < 3,0$$

Formule d'interaction :

$$\frac{N_{\bar{f},Ed}}{\chi_{\min,\bar{f}} \left(A_g k_{0,2\text{proof},\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,\bar{f}}} \right)} + \frac{k_y M_{y,\bar{f},Ed}}{M_{y,\bar{f},\theta,Rd}}$$

$$M_{y,\bar{f},\theta,Rd} = k_{2,\theta} \left(\frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,\bar{f}}} \right) M_{Rd} = 0,518 \times \left(\frac{1,1}{1,0} \right) \times 8,75 = 4,99 \text{ kN.m}$$

$$\frac{13,0 \times 10^3}{0,477 \times 1500 \times 0,377 \times \frac{220}{1,0}} + \frac{1,009 \times 1,82}{4,99} = 0,219 + 0,368 = 0,587$$

$$0,587 < 1,00$$

La résistance de la barre est donc satisfaisante pour la sollicitation de flexion composée en conditions d'incendie.

Éq. 7.13