

Exemple d'application de l'EN 1993-1-2 : Poutre comprimée et fléchie

P. Schaumann, T. Trautmann

University of Hannover – Institute for Steel Construction, Hannover, Germany

1 OBJECTIF

Il s'agit de vérifier la résistance au feu d'une poutre métallique isostatique soumise à la fois en compression et en flexion dans un bâtiment de type bureau (figure 1). Pour cet exemple, les phénomènes d'instabilité sont pris en compte. La poutre est protégée contre le feu en caisson avec plaques de plâtre. En raison de la présence de la dalle de béton, la poutre est exposée au feu sur trois faces. Il n'y a pas de connecteur entre la poutre et la dalle de béton. La résistance au feu exigée pour cette poutre est R90.

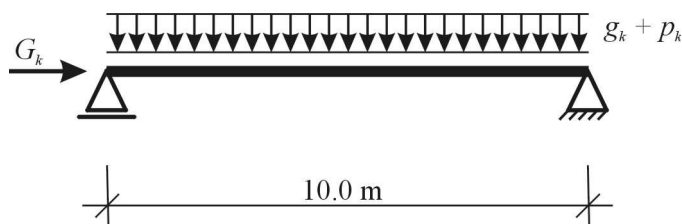


Figure 1 : Poutre isostatique

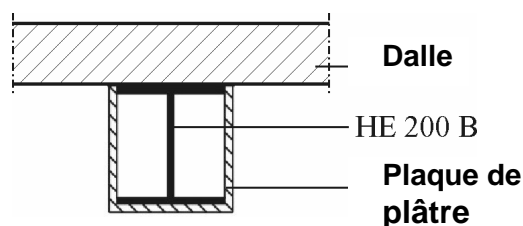


Figure 2 : Section transversale de la poutre

Propriétés matérielles:

Poutre:

Profilé:	Section laminée HEB 200
Nuance d'acier:	S235
Classe de la section:	1
Limite d'élasticité:	$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
Module d'élasticité:	$E = 210,000 \text{ N/mm}^2$
Module de cisaillement:	$G = 81,000 \text{ N/mm}^2$
Aire de la section:	$A_a = 7810 \text{ mm}^2$

Moment d'inertie: $I_z = 2000 \text{ cm}^4$
 Moment d'inertie de torsion : $I_t = 59,3 \text{ cm}^4$
 Moment d'inertie de gauchissement : $I_w = 171,100 \text{ cm}^6$
 Modules de flexion élastique et plastique:
 $W_{el,y} = 570 \text{ cm}^3$
 $W_{pl,y} = 642,5 \text{ cm}^3$

Protection en caisson:

Matériau : plaque de plâtre
 Epaisseur : $d_p = 15 \text{ mm}$

Charge :

Charges permanentes: $G_k = 96,3 \text{ kN}$
 $g_k = 1,5 \text{ kN/m}$
 Charges variables: $p_k = 1,0 \text{ kN/m}$

2 RESISTANCE AU FEU D'UNE POUTRE FLECHIE ET COMPRIMEE

2.1 Actions mécaniques en situation d'incendie

EN 1991-1-2

La combinaison d'actions mécaniques en situation d'incendie doit être réalisée en considérant une situation accidentelle :

$$E_d = E \left(\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \right)$$

§ 4.3

Le coefficient de combinaison pour les actions variables principales pour les bâtiments de type bureau est $\psi_{1,1} = 0,5$.

Par conséquent, les charges de calcul en situation d'incendie sont :

$$N_{fi,d} = 1,0 \cdot 96,3 = 96,3 \text{ kN}$$

$$M_{fi,d} = [1 \cdot 1,5 + 0,5 \cdot 1,0] \frac{10^2}{8} = 25,0 \text{ kNm}$$

2.2 Calcul de la température maximale de l'acier

EN 1993-1-2

La température du poteau est calculée conformément à l'EN 1993-1-2 en fonction du facteur de massiveté de l'élément.

Pour un élément protégé en caisson et exposé au feu sur trois faces, le facteur de massiveté est donné par :

$$\frac{A_p}{V} = \frac{2 \cdot h + b}{A_a} = \frac{2 \cdot 20 + 20}{78,1} 10^2 = 77 \text{ m}^{-1}$$

§ 4.2.5.2

En utilisant l'abaque donné dans le procès verbal qualifiant la protection rapporté à la poutre, la température maximale $\theta_{a,max,90}$ du poteau après 90 minutes d'exposition au feu conventionnel est :

$$\theta_{a,max,90} \approx 445 \text{ °C}$$



Figure 3 : Température maximale dans l'acier

2.3 Vérification par la méthode de la température critique

EN 1993-1-2

Une méthode pratique pour la vérification de la résistance au feu d'un élément est celle relative au domaine des températures. Dans cette méthode, on considère que la résistance au feu de l'élément est assurée si la température de l'élément, après une certaine durée d'exposition au feu, est inférieure à sa température critique.

Toutefois, dans le cas d'un élément pour lequel les problèmes d'instabilité doivent être pris en compte (élément comprimé, élément fléchi et comprimé...), ce qui est le cas ici, cette méthode ne s'applique pas.

§ 4.2.4

2.4 Vérification de la résistance mécanique

Les éléments métalliques de classe 1 doivent être analysés pour les problèmes de flambement par flexion et de déversement latéral.

2.4.1 Flambement par flexion sans risque de déversement

La vérification d'un élément de classe 1 pour le flambement par flexion est donnée par la relation suivante :

$$\frac{N_{fi,d}}{\chi_{\min,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_y \cdot M_{y,fi,d}}{W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1$$

§ 4.2.3.5

Le facteur de réduction $\chi_{\min,fi}$ est la valeur minimale des deux facteurs de réduction pour le flambement $\chi_{y,fi}$ et $\chi_{z,fi}$ définis en fonction de l'élançement réduit de l'élément selon chaque axe pour la température θ_a .

L'élançement réduit en situation d'incendie selon chaque axe est déterminé à partir de l'élançement réduit à froid :

EN 1993-1-1

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr}}{i_y \cdot \lambda_a} = \frac{1000}{8.54 \cdot 93.9} = 1.25$$

§ 6.3.1.3

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_z \cdot \lambda_a} = \frac{1000}{5.07 \cdot 93.9} = 2.10$$

Les facteurs de réduction $k_{y,\theta}$ et $k_{E,\theta}$ pour la limite d'élasticité et pour le module d'élasticité de l'acier sont déterminés à partir du tableau 3.1 du EN 1993-1-2.

Pour l'exemple concerné, avec $\theta_a = 540$ °C on obtient :

EN 1993-1-2

$$\Rightarrow k_{y,\theta} = 0.656$$

§ 3.2.1

$$k_{E,\theta} = 0.484$$

L'élançement réduit selon chaque axe en situation d'incendie est alors donné par l'expression :

$$\lambda_{y,\theta} = \bar{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{K_{E,\theta}}} = 1.25 \sqrt{\frac{0.825}{0.625}} = 1.45$$

§ 4.2.3.2

$$\lambda_{z,\theta} = \bar{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{K_{E,\theta}}} = 2.1 \sqrt{\frac{0.825}{0.625}} = 2.43$$

Avec :

$$\alpha = 0.65 \cdot \sqrt{235/f_y} = 0.65 \cdot \sqrt{235/235} = 0.65$$

et :

$$\varphi_{y,\theta} = 0.5 \cdot (1 + \alpha \bar{\lambda}_{y,\theta} + \bar{\lambda}_{y,\theta}^2) = 0.5 \cdot (1 + 0.65 \times 1.45 + 1.45^2) = 2.04$$

$$\varphi_{z,\theta} = 0.5 \cdot (1 + \alpha \bar{\lambda}_{z,\theta} + \bar{\lambda}_{z,\theta}^2) = 0.5 \cdot (1 + 0.65 \times 2.43 + 2.43^2) = 4.27$$

Les facteurs de réduction pour le flambement $\chi_{y,fi}$ et $\chi_{z,fi}$ sont déterminés par les relations suivantes:

$$\chi_{y,fi} = \frac{1}{\varphi_{y,\theta} + \sqrt{\varphi_{y,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{y,\theta}^2}} = \frac{1}{2.04 + \sqrt{2.04^2 - 1.45^2}} = 0.29$$

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{\varphi_{z,\theta} + \sqrt{\varphi_{z,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{z,\theta}^2}} = \frac{1}{4.27 + \sqrt{4.27^2 - 2.43^2}} = 0.13$$

Vérification :

$$\frac{96,3}{0,13 \cdot 78,1 \cdot 0,835 \cdot 23,5} + \frac{1,33 \cdot 2500}{642,5 \cdot 0,835 \cdot 23,5} = 0.76 < 1$$

§ 4.2.3.5

Avec :

$$\begin{aligned}\mu_y &= (1,2 \beta_{M,y} - 3) \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44 \beta_{M,y} - 0,29 \\ &= (1,2 \times 1,3 - 3) \times 1,45 + 0,44 \times 1,3 - 0,29 \\ &= -1,82\end{aligned}$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} = 1 - \frac{1,82 \times 96,3}{0,29 \times 78,1 \times 0,835 \times 23,5 / 1,0} = 1,40$$

2.4.2 Flambement avec risque de déversement

La seconde vérification concerne le problème de flambement avec risque de déversement :

$$\frac{N_{fi,d}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,fi,d}}{\chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1$$

Dans ce cas, il faut calculer les facteurs de réduction à la fois pour le flambement et pour le déversement. La valeur du facteur de réduction pour le flambement $\chi_{z,fi}$ est calculée au paragraphe précédent.

La valeur de l'élancement réduit en cas de déversement est calculée de la manière suivante :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{642,5 \cdot 23,5}{14,420,4}} = 1,05$$

Où :

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right]$$

$$= 1,12 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21,000 \cdot 2000}{(1,0 \cdot 1000)^2}$$

$$\left[\sqrt{\left(\frac{1,0}{1,0} \right)^2 \frac{171,100}{2000} + \frac{(1,0 \cdot 1000)^2 \cdot 8100 \cdot 59,3}{\pi^2 \cdot 21,000 \cdot 2000} + \left(0,45 \cdot \frac{20}{2} \right)^2} - 0,45 \cdot \frac{20}{2} \right]$$

$$= 14,420,4 \text{ kNcm}$$

L'élancement réduit en cas de déversement en situation d'incendie est donné par l'expression :

$$\lambda_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \cdot \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{K_{E,\theta}}} = 1,02 \sqrt{\frac{0,825}{0,625}} = 1,18$$

Avec :

$$\varphi_{LT,\theta} = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{LT,\theta} + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,65 \times 1,18 + 1,18^2) = 1,59$$

Le facteur de réduction pour le flambement $\chi_{LT,fi}$ est :

EN 1993-1-1

§ 6.3.2.2

§ C.2.2

EN 1993-1-2

§ 4.2.3.3

$$\chi_{LT,\beta} = \frac{1}{\varphi_{LT,\theta} + \sqrt{\varphi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} = \frac{1}{1,59 + \sqrt{1,59^2 - 1,18^2}} = 0,38$$

Vérification :

$$\frac{96,3}{0,13 \cdot 78,1 \cdot 0,835 \cdot 23,5} + \frac{0,155 \cdot 2500}{0,38 \cdot 642,5 \cdot 0,835 \cdot 23,5} = 0,57 < 1$$

§ 4.2.3.5

La stabilité au feu R90 est donc assurée.

Avec :

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,d}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} = \frac{0,33 \times 93,3}{0,13 \times 78,1 \times 0,835 \times 23,5 / 1,0} = 0,155$$

$$\begin{aligned} \mu_{LT} &= 0,15 \bar{\lambda}_{z,\theta} \beta_{M,LT} - 0,15 \\ &= 0,15 \times 2,43 \times 1,3 - 0,15 \\ &= 0,33 < 0,9 \end{aligned}$$

REFERENCES

- EN 1991, *Eurocode 1: Actions sur les structures – Partie 1-2: Actions générales – Actions sur les structures exposée au feu*, Bruxelles: CEN, Novembre 2002.
- EN 1993, *Eurocode 3: Calcul des structures en acier – Partie 1-1: Règles générales*, Bruxelles: CEN, Mai 2002.
- EN 1993, *Eurocode 3: Calcul des structures en acier – Partie 1-2: Règles générales – Calcul du comportement au feu*, Bruxelles: CEN, Novembre 2002.