

## CALCUL AU FEU DES STRUCTURES METALLIQUES

### Exemple de calcul des éléments métalliques exposés au feu

#### Partie 2

*Cette partie regroupe quelques exemples d'application sur la formulation donnée dans le cours théorique concernant le calcul au feu des structures métalliques. Ils vont permettre à l'étudiant de bien comprendre les modalités d'évaluation de la résistance des éléments porteurs tels que les éléments en traction, en compression et en flexion. Les trois principes d'évaluation de la résistance des éléments structuraux en situation d'incendie sont présentées ce qui va permettre par la suite aux étudiants de dimensionner les éléments exposés au feu d'un projet de charpente métallique.*

## ELEMENTS EN TRACTION

### Exemple 1 : Calcul de la résistance d'un élément en traction suivant les trois mode de résistance en termes de capacité portante, de durée de résistance et de température critique

un élément de section circulaire creuse de diamètre  $D=250\text{mm}$  et d'épaisseur  $d=5\text{mm}$ , la limite élastique  $f_y = 355\text{N/mm}^2$ , l'effort axial calculée en situation d'incendie est  $E_{d,fi} = 100\text{kN}$ . Le temps de résistance demandé est  $t_{req} = 30\text{min}$ . Exprimer la performance et la résistance de l'élément en termes de charge, de temps et de température.

I-Vérification en terme de charges

Le temps de résistance au feu exigé  $R_{fi,d,t} \geq E_{d,fi}$  à  $t=t_{req}$

1-Calcul de la température dans la section d'acier

On calcul le coefficient de massivité

Périmètre de la section :  $A_m = \pi D = 3.14 \times 0.25 = 0.785\text{m} \times 1\text{m}$

Surface de la section =  $V = \pi(D^2 - (D-2d)^2)/4 \times 1\text{m} = 3.14(0.25^2 - 0.24^2)/4 = 0.03848\text{m}^2 \times 1\text{m}$

Le coefficient de massivité  $(A_m/V) = 0.785/0.03848 = 204\text{m}^{-1}$

Cette valeur est proche à  $1/d = 200\text{m}^{-1}$

Du tableau I.1 (3.2) Chapitre 4, avec une interpolation dans ce tableau pour les valeurs :

$A_m/V = 200\text{m}^{-1}$  on a  $\theta_a = 828^\circ\text{C}$  et  $A_m/V = 400\text{m}^{-1}$  on a  $\theta_a = 837^\circ\text{C}$ , on peut prendre approximativement la température de ruine  $\theta_a = 828^\circ\text{C}$ .

2-détermination de l'effort de résistance en situation d'incendie  $N_{fi,t,Rd}$ .

\*calcul du coefficient de réduction  $k_{y,\theta}$  à partir du tableau ci-dessous EN 1993-1-2 §3.2.1

Pour une température  $\theta_a =$  entre  $(800 \text{ et } 900)^\circ\text{C}$  et pour  $\theta_a = 828^\circ\text{C}$ , on trouve  $k_{y,\theta} = 0.096$

-la limite élastique à froid :  $f_y = 355\text{N/mm}^2$  (MPa)

-la limite élastique correspondant à  $\theta_a = 828^\circ\text{C}$  est

$$f_{y,\theta} = k_{y,\theta} \cdot f_y = 0.096 \times 355 = 34.08\text{N/mm}^2$$

$$N_{fi,t,Rd} = A f_{y,\theta} = 3848 \times 34.08 = 131\text{kN} \geq N_{fi,Ed} = 100\text{kN}$$

La charge limite ultime est bien supérieure à la charge appliquée due au charge extérieure.

La marge de sécurité est de l'ordre :

$$(131-100)/100 = 31\%$$

**Vérification en terme de temps :**

Le temps de résistance  $t_{fi,d}$  de l'élément en traction doit être supérieure au temps exigé dans ce cas  $t_{req} = 30\text{minute}$ . Cela est atteint lorsque  $R_{fi,d,t} = E_{d,fi}$  c.a.d  $t_{fi,d} \geq t_{req}$  lorsque  $N_{fi,t,Rd} = N_{fi,Ed}$

A l'équilibre limite :  $N_{fi,t,Rd} = S \cdot f_{y,\theta} = 3848 \times f_{y,\theta} = 100\text{kN} \Rightarrow f_{y,\theta} = 25.99\text{N/mm}^2$

Le facteur de réduction  $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y = 25.99 / 355 = 0.0732$ .

L'interpolation dans le tableau ci-dessous entre 0.06 et 0.11 donne un température  $\theta_a = 874^\circ\text{C}$  pour le facteur 0.0732.

Le tableau 3.2 du chapitre 3 permet de déterminer un temps de 39 minutes pour une température de  $874^\circ\text{C}$  dans la section donnée pour un coefficient de massivité de  $200\text{m}^{-1} \approx 204\text{m}^{-1}$ .

On peut dire qu'on a une marge de sécurité de 9 min.

**Vérification en termes de température :**

L'effort de résistance à froid et donné par :  $R_{d,fi,0} = S \cdot f_y = 3848 \times 355 = 1366\text{kN}$

$A_m/V$ [ $\text{m}^{-1}$ ]	400	200
$V/A_m$ [mm]	2.5	5.0
Time [min.]	837	828

Températures acier

30 → 837 | 828

828°C

Après interpolation linéaire entre les deux valeurs

$$\theta_a = 828^\circ\text{C} \quad k_{y,\theta}$$

800°C	0,110
$\theta_a = 828^\circ\text{C}$	$k_{y,\theta} = 0,096$
900°C	0,060

EXEMPLES D'APPLICATIONS

Soit :  $\mu_0 = E_{f_i,d} / R_{d,f_i,0} = 100 / 1366 = 0.0732$

$$\theta_{cr} = 39.19 \ln \left[ \frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482$$

$$\theta_{cr} = 39.19 \ln \left[ \frac{1}{0.9674 \times 0.0732^{3.833}} - 1 \right] + 482 = 876^\circ\text{C}$$

Pour le temps exigé  $t_{req} = 30 \text{ min}$  et pour un coefficient de massivité  $A_m/V = 204 \text{ m}^{-1}$ , on trouve une température  $\theta_d = 828^\circ\text{C}$  alors la température qui peut s'exercer sur la structure est inférieure à la température que peut supporter la section qui est égale à  $876^\circ\text{C}$ . on a alors une revanche de  $30^\circ\text{C}$

Température de l'acier $\theta_a$	Facteurs de réduction à la température $\theta_a$ par rapport à la valeur de $f_y$ ou $E_a$ à $20^\circ\text{C}$		
	Facteur de réduction (par rapport à $f_y$ ) pour la limite d'élasticité efficace $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Facteur de réduction (par rapport à $f_y$ ) pour la limite de proportionnalité $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Facteur de réduction (par rapport à $E_a$ ) pour la pente du domaine élastique linéaire $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000

**NOTE :** Pour des valeurs intermédiaires de la température de l'acier, une interpolation linéaire peut être utilisée.

## ELEMENTS EN FLEXION

### Exemple1 : Calcul au feu d'une poutre IPE non protégée, exposée à la courbe température-temps normalisée

*Cet exemple présente le calcul de la résistance au feu d'une poutre métallique simplement appuyée. Le transfert de chaleur dans la poutre est évalué selon une méthode de calcul pas-à-pas. La résistance structurale de la poutre à température élevée est déterminée suivant le modèle de calcul simple pour des éléments fléchis, d'après l'EN 1993-1-2.*

La poutre étudiée est une poutre de plancher d'un bâtiment à usage de bureaux. Il s'agit d'un profilé laminé à chaud de la gamme IPE. Cette poutre est soumise à une charge uniformément répartie. Elle est maintenue latéralement vis-à-vis du déversement, par une dalle en béton armé. La poutre est calculée pour atteindre une résistance au feu **R15**.

#### Données

##### Propriétés du matériau

Nuance de l'acier : S 275

Limite d'élasticité :  $f_y = 275 \text{ N/mm}^2$

Densité :  $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$

##### Coefficients partiels de sécurité

$\gamma_G = 1,35$

$\gamma_{M0} = 1,00$

$\gamma_Q = 1,50$

$\gamma_{M,fi} = 1,00$

##### Sollicitations à température normale

La valeur caractéristique de la charge est :

##### Sollicitations à température normale

La valeur caractéristique de la charge est :

En ELS :  $P_s = g_k + q_k = 4.8 + 7.8 = 12.6 \text{ kN/m}$

En ELU :  $P_u = 1.35g_k + 1.5q_k = 1.35 \times 4.8 + 1.5 \times 7.8 = 18.18 \text{ kN/m}$

##### Calcul à température normale

Le moment fléchissant et l'effort tranchant sont donnés en ELU par :

$$M_{Ed} = P_u l^2 / 8 = 18.18 \times 7.4^2 / 8 = 124.40 \text{ kN.m}$$

$$V_{Ed} = P_u l / 2 = 18.18 \times 7.4 / 2 = 67.3 \text{ kN}$$

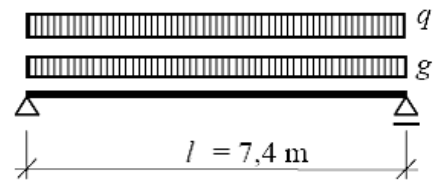


Figure 1: Système statique

#### Charges

Action permanente :

$g_k = 4,8 \text{ kN/m}$

Action variable :

$q_k = 7,8 \text{ kN/m}$

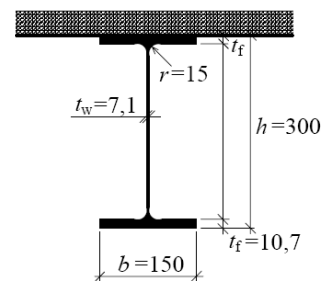


Figure 2: Section transversale

#### A l'Etat Limite Ultime :

On admet que la dalle en béton assure un maintien latéral complet de la semelle comprimée. Il n'y a donc pas lieu de tenir compte de l'instabilité par déversement.

#### 1-Vérification de la résistance de la poutre

-Résistance en flexion EN 1993-1-1 §6.2.5

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{628,4 \cdot 10^3 \cdot 275}{1,0} = 172,8 \text{ kNm} > 124,4 \text{ kNm} = M_{Ed} \quad \text{OK}$$

-Résistance à l'effort tranchant EN 1993-1-1 §6.2.6:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{v,z} f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{2568 \cdot 275}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 407,7 \text{ kN} > 67,3 \text{ kN} = V_{Ed} \quad \text{OK}$$

#### A l'Etat Limite de Service : EC3

le profilé est vérifié pour une limite de flèche de  $L/250$  (où L est la portée) :

$$f = \frac{5 p_s l^4}{384 EI_y} = \frac{5}{384} \frac{12.60 \times 7400^4}{210000 \times 83.56 \times 10^6} = 28.0 \text{ mm} < 29.6 \text{ mm} = \frac{l}{250} \text{ ok}$$

(Les limites de flèche sont données dans l'EC3. Il s'agit ici d'une limite couramment utilisée).

La section est satisfaisante à température normale.

La section est satisfaisante à température normale.

### Calcul en situation d'incendie

#### Sollicitations en situation d'incendie

D'après la règle simplifiée de l'EN 1991-1-2, les sollicitations en situation d'incendie peuvent être déterminées à partir des sollicitations de calcul en situation normale [EN1991-1-2 §4.3.2](#).

La situation accidentelle est considérée pour la combinaison des sollicitations durant l'exposition au feu, le facteur  $\psi$  est pris égal à  $\psi_{2,1} = 0,3$  pour des bâtiments à usage de bureaux.

Le coefficient de réduction pour le niveau correspondant au chargement de calcul est :

$$\eta_{fi} = \frac{g_k + \psi q_k}{g_k \gamma_G + q_k \gamma_Q} = \frac{4,8 + 0,3 \cdot 7,8}{4,8 \cdot 1,35 + 7,8 \cdot 1,5} = 0,393$$

$\psi$  est un paramètre qui doit être déterminé au niveau national :  $\psi_{2,1}$  est la valeur recommandée pour le calcul selon l'EN 1991-1-2.

Le moment fléchissant et l'effort tranchant en situation d'incendie sont donnés par :

$$M_{fi,Ed} = \eta_{fi} M_{Ed} = 0.393 \times 124.4 = 48.9 \text{ kNm}$$

$$V_{fi,Ed} = \eta_{fi} V_{Ed} = 0.393 \times 67.3 = 26.45 \text{ kNm}$$

#### Evaluation de la température des gaz

La courbe température – temps normalisée est utilisée pour la température des gaz. [EN1991-1-2 §3.2.1](#)

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

#### Evaluation de la température de la poutre

La ligne en tirets sur la **Figure 3** indique le périmètre qui est considéré pour l'exposition au feu. Le facteur de massivité est calculé de la façon suivante :

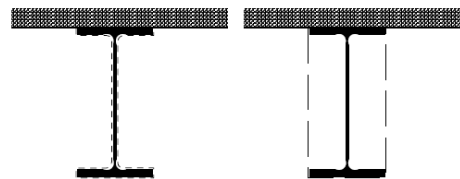
$$\begin{aligned} \frac{A_m}{V} &= \frac{3b + 2(h - t_w - 4r) + 2\pi r}{A} = \\ &= \frac{3 \cdot 150 + 2 \cdot (300 - 7,1 - 4 \cdot 15) + 2 \cdot \pi \cdot 15}{5381} = 0,188 \text{ mm}^{-1} = 188 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

Pour des profilés IPE, le facteur de correction  $k_{sh}$  pour l'effet d'ombre est [EN 1993-1 2 §4.2.5.](#):

$$k_{sh} = 0,9 \left( \frac{A_m}{V} \right)_b = 0,9 \frac{b + 2h}{A} = 0,9 \frac{150 + 2 \cdot 300}{5381} = 0,9 \cdot 0,741 = 0,667$$

Où  $(A_m/V)_b$  est calculé suivant la ligne en tirets qui entoure la section comme indiqué à la **Figure 3**.

L'augmentation de température dans la section en acier est calculée selon une procédure de calcul par incrémentation donnée dans l'EN 1993-1-2, par l'équation : [EN 1993-1-2 §4.2.5.1](#)



**Figure 3: Evaluation du facteur de correction  $k_{sh}$  pour l'effet d'ombre**

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

L'intervalle de temps  $\Delta t = 5$  secondes est considéré pour le calcul de la température. Le flux thermique net est : [EN1991-1-2 §3.2.1](#)

$$\begin{aligned} \dot{h}_{net} &= \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \\ &= \alpha_c (\theta_g - \theta_m) + \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma ((\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4) = \\ &= 25 \cdot (\theta_g - \theta_m) + 3,969 \cdot 10^8 \cdot ((\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4) \end{aligned}$$

EXEMPLES D'APPLICATIONS

Où :

$\epsilon_m$  : est l'émissivité pour l'acier de carbone ( $\epsilon_m = 0,7$ ), pour l'acier inox ( $\epsilon_m = 0,8$ )  
 - EN1993-1-2 §2.2) pour les autres matériaux il n'ya pas de spécification

$\epsilon_f$ : est l'émissivité du feu ( $\epsilon_f = 1,0$ ) – EN1991-1-2 §3.1)

$\Phi$  est le facteur de forme ( $\Phi = 1,0$ ) – EN1991-1-2 §3.1)

$\alpha_c$ = est le coefficient de transfert thermique à utiliser avec la courbe température – temps normalisée (donné dans l'EN1991-1-2 §3.2.1 :  $\alpha_c = 25,0 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , dans le cas du feu naturel

$\alpha_c = 35,0 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ) et dans le cas du feu d'hydrocarbure  $\alpha_c = 50,0 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

$\sigma$  est la constante de Stephan Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ )

en prenant ( $\epsilon_f = 1,0$ ), ( $\Phi = 1,0$ ) et l'hypothèse que la température de radiation est égale à la température du feu, le flux thermique net peut être calculer par la formule suivante :

$$h_{net} = \alpha_c (\theta_{g,t} - \theta_{m,t}) + \epsilon_m \sigma (\theta_{g,t}^4 - \theta_{m,t}^4)$$

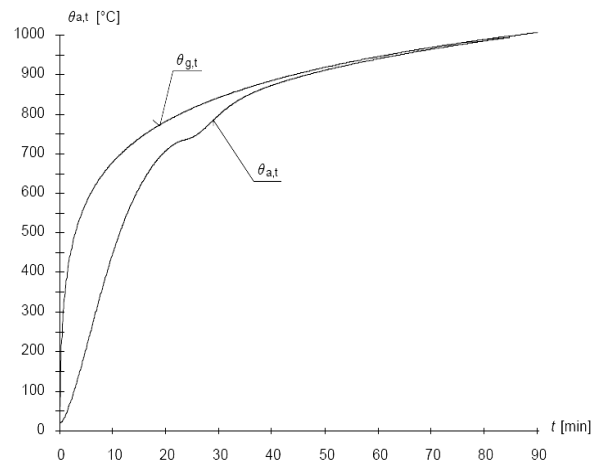
$\theta_{g,t}$  : Température des gaz ou du feu

$\theta_{m,t}$  : Température de la surface du matériaux

La courbe température – temps de la section en acier est présentée au Tableau 1 et à la Figure 4.

**Tableau 1: Calcul de la température de l'acier**

min	sec	t min	$\theta_g$ °C	$h_{net,r}$ W/m <sup>2</sup>	$h_{net,c}$ W/m <sup>2</sup>	$h_{net,d}$ W/m <sup>2</sup>	$C_a$ J/kg°C	$\Delta_{a,t}$ °C	$\theta_{a,t}$ °C
		0	20,0	0	0	0	440	0,0	20,0
		5	96,5	448	1913	2361	440	0,0	20,0
		10	147,0	940	3163	4103	440	0,4	20,4
		15	184,6	1443	4086	5529	440	0,7	21,2
		20	214,7	1944	4813	6756	441	1,0	22,2
14	40	14,6667	735,2	17397	3249	20646	762	2,2	605,3
14	45	14,7500	736,1	17301	3216	20517	764	2,2	607,4
14	50	14,8333	736,9	17205	3184	20389	766	2,1	609,6
14	55	14,9167	737,7	17109	3151	20260	767	2,1	611,7
15	00	15,0000	738,6	17013	3119	20132	769	2,1	<b>613,8</b>
15	05	14,0833	739,4	16916	3088	20004	771	2,1	615,9



**Figure 4: Courbes température-temps de l'acier et des gaz**

La température de l'acier à l'instant  $t = 15 \text{ min}$ ,  $\theta_a = 614^\circ\text{C}$ .

Remarque :

La température de la poutre en acier peut être calculée selon le document SD004( les courbes données au chapitre précédent : calcul de la température dans les sections). Pour le facteur de massiveté  $A_m/V = 188 \text{ m}^{-1}$  et le facteur de correction pour l'effet d'ombre  $k_{sh} = 0,667$ , le facteur de massiveté  $A_m/V$  utilisé dans le diagramme du document SD004 est égal à :

$0,667 \cdot 188 = 125$  et la température de l'acier pour  $t = 15 \text{ minutes}$  est :  $\theta_a = 614^\circ\text{C}$

**Vérification dans le domaine de résistance**

**Classement de la section à température élevée**

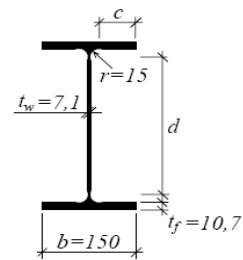
L'élanement de la semelle comprimée est :  $\frac{c}{t_f} = \frac{56,45}{10,7} = 5,3$

La limite pour la Classe 1 est  $9\epsilon$ . Pour la situation de calcul au feu,  $\epsilon$  est pris égal à 0,85 fois la valeur utilisée pour le calcul normal. La limite est donc :  $9 \times 0,85 \times 0,924 = 7,07$  EN 1993-1-2 §4.2.2

La limite n'est pas dépassée. La semelle est donc de Classe 1.

L'élanement de l'âme en flexion est :  $\frac{d}{t_w} = \frac{248,6}{7,1} = 35,0$

La limite pour la Classe 1 est  $72\epsilon$ . Pour la situation de calcul au feu,



**Figure 5: Classement de la section transversale**

## EXEMPLES D'APPLICATIONS

$\varepsilon$  est pris égal à 0,85 fois la valeur utilisée pour le calcul normal. La limite est donc :  $72 \times 0,85 \times 0,924 = 56,6$

La limite n'est pas dépassée. L'âme est donc de Classe 1. La section est donc de Classe 1 à température élevée.

Le moment résistant de calcul durant l'exposition au feu est donné par :

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{1}{\kappa_1 \kappa_2} \frac{k_{y,\theta} W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{EN 1993-1-2 §4.2.3.3(3)}$$

Le facteur de réduction  $k_{y,\theta}$  pour la température de l'acier  $\theta_a = 614^\circ\text{C}$  est :

$$k_{y,\theta} = 0,436 \quad \text{EN 1993-1-2 §3.2.1}$$

Le facteur d'adaptation  $\kappa_1 = 0,7$  est utilisé pour une poutre non protégée exposée au feu sur trois faces. EN 1993-1-2 §4.2.3.3(7)

Le facteur d'adaptation  $\kappa_2 = 1,0$  est utilisé pour une poutre sur appuis simples. EN 1993-1-2 §4.2.3.3(8)

Le moment résistant de calcul à la température  $\theta_a = 614^\circ\text{C}$  est donné par :

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{1}{0,7 \cdot 1,0} \cdot \frac{0,436 \cdot 628,4 \cdot 10^3 \cdot 275}{1,0} = 107,6 \text{ kNm} > 48,9 \text{ kNm} \quad \text{OK}$$

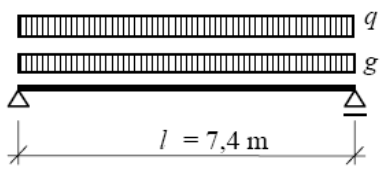
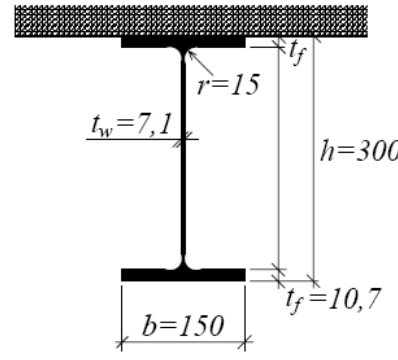
La résistance de calcul à l'effort tranchant est donnée par :

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \frac{A_{v,z} f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M,fi}} = 0,436 \cdot \frac{2568 \cdot 275}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 177,8 \text{ kN} > 26,4 \text{ kN} = V_{fi,Ed} \quad \text{OK}$$

La section est donc satisfaisante pour la situation de calcul au feu.

**Exemple2 : Calcul au feu d'une poutre non protégée à partir de courbes**

Cet exemple traite le calcul au feu d'un profilé IPE laminé à chaud faisant partie d'une ossature de plancher d'un **bâtiment administratif**. La poutre est uniformément chargée et maintenue latéralement vis-à-vis du déversement par la présence d'une dalle en béton armé appuyée sur la semelle supérieure. La poutre est calculée pour justifier une résistance au feu **R15** sans avoir recours à un matériau de protection. Dans cet exemple, les actions thermiques sont déterminées en utilisant le document SD002.

	<p><b>Données</b>  <b>Propriétés du matériau</b>                  Nuance de l'acier : S 275                  Limite d'élasticité : <math>f_y = 275 \text{ N/mm}^2</math>                  Densité : <math>\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3</math></p>				
<p><b>Figure 1: modèle mécanique statique</b></p>	<p><b>Charges</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Action permanente : <math>g_k = 4,8 \text{ kN/m}</math></td> <td>Action variable : <math>q_k = 7,8 \text{ kN/m}</math></td> </tr> </table>	Action permanente : $g_k = 4,8 \text{ kN/m}$	Action variable : $q_k = 7,8 \text{ kN/m}$		
Action permanente : $g_k = 4,8 \text{ kN/m}$	Action variable : $q_k = 7,8 \text{ kN/m}$				
<p><b>Coefficients partiels de sécurité</b></p> <table border="1"> <tr> <td><math>\gamma_G = 1,35</math></td> <td><math>\gamma_{M0} = 1,00</math></td> </tr> <tr> <td><math>\gamma_Q = 1,50</math></td> <td><math>\gamma_{M,fi} = 1,00</math></td> </tr> </table>	$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_{M0} = 1,00$	$\gamma_Q = 1,50$	$\gamma_{M,fi} = 1,00$	
$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_{M0} = 1,00$				
$\gamma_Q = 1,50$	$\gamma_{M,fi} = 1,00$				
<p><b>Sollicitations à température normale</b>                  La valeur caractéristique de la charge est :                  En ELS : <math>P_s = g_k + q_k = 4.8 + 7.8 = 12.6 \text{ kN/m}</math>                  En ELU : <math>P_u = 1.35g_k + 1.5q_k</math>  <math>1.35 \times 4.8 + 1.5 \times 7.8 = 18.18 \text{ kN/m}</math>  <b>Calcul à température normale</b>                  Le moment fléchissant et l'effort tranchant sont donnés en ELU par :  <math>M_{Ed} = P_u l^2 / 8 = 18.18 \times 7.4^2 / 8 = 124.40 \text{ kN.m}</math>  <math>V_{Ed} = P_u l / 2 = 18.18 \times 7.4 / 2 = 67.3 \text{ kN}</math></p>					

Le profilé IPE 300 est calculé pour résister à la charge appliquée. Sa section est de Classe 1. La section est vérifiée vis-à-vis des ELU à température normale. Il est supposé que la dalle en béton assure un maintien latéral efficace de la poutre ; ainsi il n'y a pas lieu de prendre en compte le déversement.

**Vérification en ELU**

1-Résistance en flexion :

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{628,4 \cdot 10^3 \cdot 275}{1,0} = 172,8 \text{ kNm} > 124,4 \text{ kNm} = M_{Sd} \text{ OK}$$

2-Résistance à l'effort tranchant :

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{v,z} f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{2568 \cdot 275}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 407,7 \text{ kN} > 67,3 \text{ kN} = V_{Sd} \text{ OK}$$

**Vérification en ELU**

Vérification en état Limite de Service :

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{v_k l^4}{E I_y} = \frac{5}{384} \frac{12,60 \cdot 7400^4}{210000 \cdot 83,56 \cdot 10^6} = 28,0 \text{ mm} < 29,6 \text{ mm} = \frac{l}{250} \text{ OK}$$

La limite retenue ici est une valeur usuelle. La section est satisfaisante à température ambiante.



**Calcul en situation d'incendie**

**Sollicitations de calcul en situation d'incendie**

Le coefficient de réduction pour le niveau de charge de calcul est égal à :

$$\eta_{fi} = \frac{g_k + \psi_{1,1} q_k}{g_k \gamma_G + q_k \gamma_Q} = \frac{4,8 + 0,3 \cdot 7,8}{4,8 \cdot 1,35 + 7,8 \cdot 1,5} = 0,393$$

Où le facteur  $\psi$  est pris égal à  $\psi_{1,1} = 0,3$  pour des bâtiments de bureaux.

**Calcul des températures dans la section de la poutre :**

Le facteur de massivité de la section laminée est tiré du document SD004. Le facteur de section fermée pour une poutre non protégée exposée sur trois de ces côtés est égal à :

$$\left(\frac{A_m}{V}\right)_b = 139 \text{ m}^{-1}$$

Le périmètre exposé est indiqué en tirets à la

**Figure 3**. L'effet d'ombre est considéré en modifiant le facteur de massivité de la façon suivante :

$$\left(\frac{A_m}{V}\right)_{sh} = 0,9 \cdot \left(\frac{A_m}{V}\right)_b = 0,9 \cdot 139 = 125 \text{ m}^{-1}$$

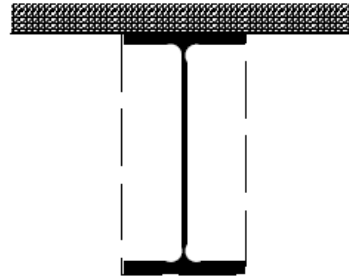


Figure 3: Evaluation du rapport  $(A_m/V)_b$

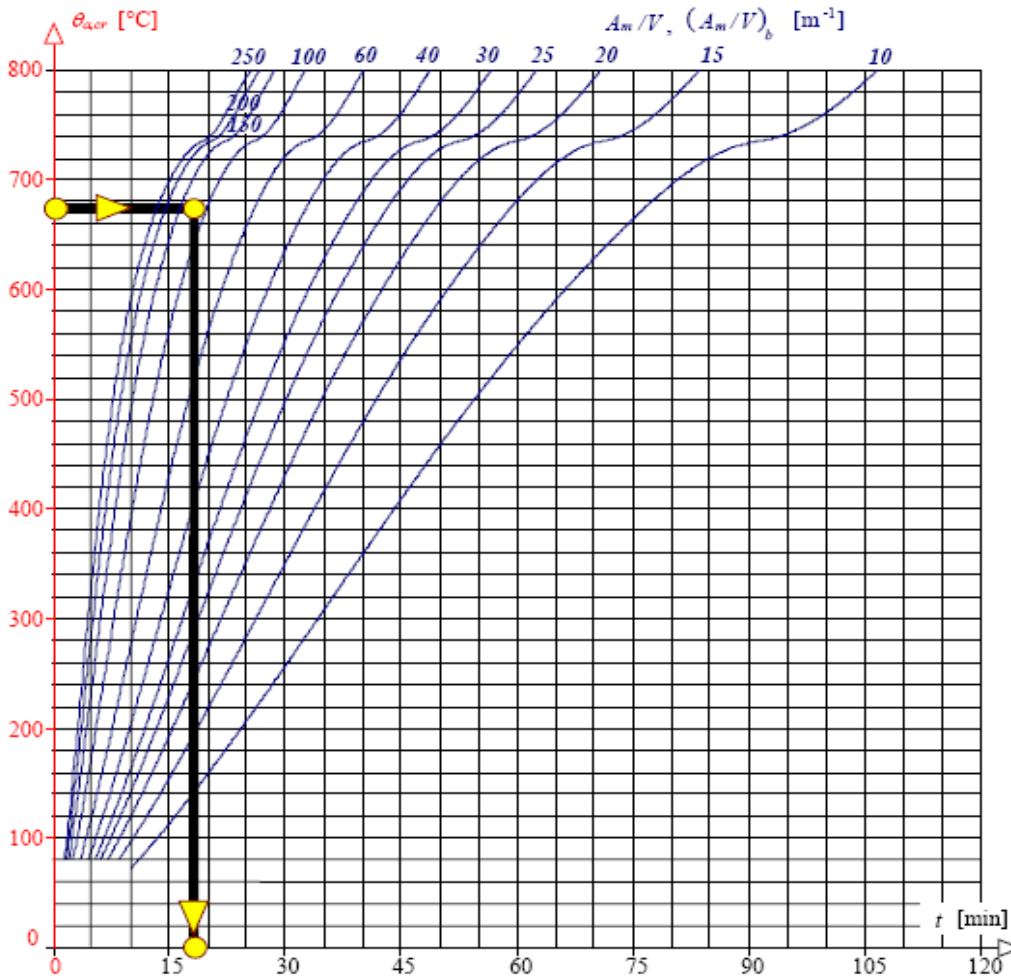


Figure 4: Nomogramme pour la prévision simplifiée de la résistance au feu

Le taux de travail de la poutre est donné par :  $\mu_0 = \eta_{fi} \kappa_1 \kappa_2 = 0,393 \times 0,7 \times 1,0 = 0,275$

La température critique est donnée par :

#### EXEMPLES D'APPLICATIONS

$$\begin{aligned}\theta_{a,cr} &= 39,19 \ln \left( \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 482 = \\ &= 39,19 \cdot \ln \left( \frac{1}{0,9674 \cdot 0,275^{3,833}} - 1 \right) + 482 = 677^\circ\text{C}\end{aligned}$$

La durée prévisible de résistance au feu obtenue à l'aide de la **Figure 4** est égale à **17 minutes**. Cela dépasse la résistance au feu R15 exigée. Par conséquent, la résistance au feu de la section, sans application d'une protection, est satisfaisante. On a une marge de sécurité de 2 minutes

ELEMENTS EN COMPRESSION

**Exemple3 : Résistance au feu d'un poteau HEB non protégé, exposé à la courbe température - temps normalisée**

Cet exemple d'application présente le calcul de la résistance au feu d'un poteau continu sur deux niveaux. La température de l'acier du poteau est déterminée à partir de données de calcul tirées du document SD004. La résistance de la barre à température élevée est évaluée selon un modèle de calcul simple de l'EN 1993-1-2.

Un poteau conçu à partir d'un profilé laminé HEB supporte deux niveaux de plancher, comme indiqué à la Figure 1. L'élément est conçu sans protection au feu et sa résistance vis-à-vis du chargement doit être vérifiée pour une exposition à la courbe température-temps normalisée. **Une résistance au feu R15 est exigée.**

**Données de base**

**Propriétés du matériau**

Nuance de l'acier : S 355 Limite d'élasticité :  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$

Densité :  $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$

**Charges**

Réaction au niveau de chaque plancher due aux actions permanentes :

$$R_{G,k} = 185 \text{ kN}$$

Réaction au niveau de chaque plancher due aux actions variables :

$$R_{Q,k} = 175 \text{ kN}$$

**Sollicitation à température normale**

En partie inférieure du poteau, la sollicitation de calcul due aux charges est :

$$N_{Ed} = 2 R_{Ed} = 2 (R_{G,k} \gamma_G + R_{Q,k} \gamma_Q) = 2 \cdot (185 \cdot 1,35 + 175 \cdot 1,5) = 1024,5 \text{ kN}$$

**Calcul à température normale (à froid)**

Le profilé HEB 180 est calculé pour résister aux charges appliquées. EN 1993-1-1 §5.5

Il s'agit d'une section de Classe 1.

La longueur de flambement du poteau est prise égale à :

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 3 \text{ m}$$

Le flambement par rapport à l'axe z est le plus défavorable.

L'effort normal critique élastique pour le calcul à température normale est :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 1363 \times 10^4}{3000^2} = 3135,7 \text{ KN}$$

L'élancement réduit est obtenu par :

$$\lambda_z = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{6530 \times 355}{3135,7 \times 10^3}} = 0,739$$

Le coefficient de réduction pour le flambement d'un profilé laminé à chaud avec un rapport  $h/b < 1,2$  est calculé à partir de la courbe c (facteur d'imperfection :  $\alpha = 0,49$ ).

$$\begin{aligned} \phi &= 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2) \\ \phi &= 0,5(1 + 0,49(1,003 - 0,2) + 1,003^2) = 1,2 \end{aligned}$$

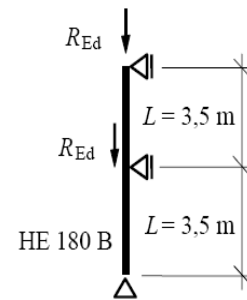
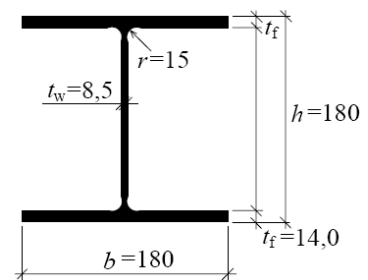


Figure 1 : Système Statique



$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_z^2}} = \frac{1}{1.2 + \sqrt{1.2^2 - 1.003^2}} = 0.538$$

La section est vérifiée à l'Etat Limite Ultime pour le calcul à température Normale.

$$N_{b,Rd} = \chi_z \frac{A f_y}{\gamma_{M1}} = 0.538 \frac{6\,525 \times 355}{1.0} = 1246.2 \text{ kN} > 1024.5 \text{ kN}$$

La section est satisfaisante pour le calcul à température normale.

### Calcul en situation d'incendie

#### Sollicitations de calcul en situation d'incendie

En utilisant la règle simplifiée de l'EN 1991-1-2, des actions en situation d'incendie peuvent être déterminées à partir des actions en situation normale. [EN1991-1-2 §4.3.2](#)

On se réfère à la situation accidentelle pour la combinaison des actions Durant l'exposition au feu, où le coefficient  $\psi$  est pris égal à  $\psi_{2,1} = 0.3$  pour des bâtiments de bureaux. Le coefficient de réduction pour le niveau de Charge de calcul est pris égal à :

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi Q_k}{G_k \gamma_G + Q_k \gamma_k} = \frac{185 + 0.3 \times 175}{1.35 \times 185 + 1.5 \times 175} = 0.464$$

$$N_{fi,Ed} = \eta_{fi} N_{ED} = 0.464 \times 1024.5 = 475.0 \text{ kN}$$

**Note:** La valeur de  $\psi$  retenue pour cet exemple est la valeur recommandée de [EN1993-1-2 §2.4.2](#)

#### Evaluation de la température des gaz

La courbe température-temps normalisée est utilisée pour la température des gaz. [EN1991-1-2 §3.2.1](#) :

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

#### Evaluation de la température du poteau

Le facteur de massivité pour les profilés laminés à chaud peut être calculé ou bien tiré des données fournies par le document SD004. Le facteur de massivité de l'enveloppe en caisson pour un poteau sans protection, exposé au feu sur ses quatre faces, est pris égal à :

$$\left(\frac{A_m}{V}\right)_b = 110 \text{ m}^{-1}$$

L'effet d'ombre est considéré en modifiant le facteur de massivité :

$$0.9 \left(\frac{A_m}{V}\right)_b = 0.9 \times 110 = 99 \text{ m}^{-1}$$

En se basant sur le facteur de massivité modifié,  $(A_m/V) = 99 \text{ m}^{-1}$ , la température de l'acier à l'instant  $t = 15 \text{ min}$  peut être tirée des données du document SD004.  $\theta_a = 565^\circ\text{C}$ .

La température de l'acier et celle des gaz sont représentées sur la **Figure4**

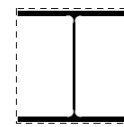


Figure 3: Evaluation des facteurs de massivité  $A_m/V$  et  $(A_m/V)_b$

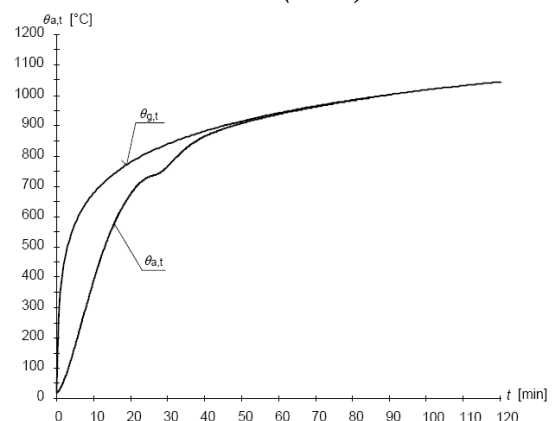


Figure 4: Courbe température – temps de l'acier et des gaz

### Vérification dans le domaine de résistance

#### Classement de la section à température élevée

La classe de la section en compression peut être obtenue d'après le document SD002. Le profilé HEB 180 est de Classe 1 à température élevée.

Les coefficients de réduction pour la relation contrainte – déformation à la température  $\theta_{a,max} = 565^\circ\text{C}$  sont :  $k_{y,\theta} = 0,578$  pour la résistance et  $k_{E,\theta} = 0,411$  pour le module élastique. A condition que la résistance au feu de la dalle en béton qui sépare les deux niveaux ne soit pas inférieure à la résistance au feu du poteau, la longueur de flambement est réduite à : [EN 1993-1-2 §4.2.3.2](#)

$$L_{cr,y,fi} = L_{cr,z,fi} = 0,7xL = 0,7x3,5 = 2,45\text{m}$$

L'effort normal critique de flambement à température normale est donné par :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 210000 \times 1363 \times 10^4}{2450^2} = 4706 \text{ kN}$$

L'élancement réduit à température normale est :

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{6530 \cdot 355}{4706,3 \cdot 10^3}} = 0,702$$

L'élancement réduit à la température  $\theta_a$  est : [EN1993-1-2 § 4.2.3.2](#)

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[ k_{y,\theta} / k_{E,\theta} \right]^{0,5} = 0,702 \cdot [0,578 / 0,411]^{0,5} = 0,833$$

Le coefficient de réduction pour le flambement est alors :  $\chi_{z,fi} = 0,577$

La résistance de calcul à la température  $\theta_a = 565^\circ\text{C}$  est calculée par :

$$N_{b,fi,\theta,Rd} = \chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0,578 \cdot 6525 \cdot 0,577 \cdot \frac{355}{1,0} = 772,5 \text{ kN}$$

L'effort axial de calcul est :  $N_{fi,Ed} = 475 \text{ kN}$

$$N_{fi,Ed} = 475 \text{ kN} < N_{b,fi,\theta,Rd}$$

Par conséquent, la section est satisfaisante pour la situation de calcul au feu.

## Exemple : Calcul au feu d'un poteau HEB protégé, exposé à la courbe température-temps normalisée

Cet exemple d'application présente le calcul de la résistance au feu d'un poteau continu sur deux étages. Le transfert de chaleur dans la section est évalué suivant la procédure de calcul de l'EN 1993-1-2. La résistance du poteau est déterminée à l'aide du modèle de calcul simple donné dans l'EN1993-1-2. A titre de comparaison, elle est aussi évaluée selon la procédure simplifiée du document SD005 et au moyen des données disponibles auprès des fabricants.

Le poteau étudié est constitué d'un profilé laminé à chaud de la gamme HEB. Il supporte deux niveaux de plancher et il est protégé contre l'incendie par un ciment de vermiculite projeté. Une durée de résistance au feu R90 est exigée.

### Données de base

#### Propriétés du matériau

Nuance de l'acier : S 355 Limite d'élasticité :  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$

Densité :  $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$

#### Charges

Réaction au niveau de chaque plancher due aux actions

permanentes :  $R_{G,k} = 185 \text{ kN}$

Réaction au niveau de chaque plancher due aux actions variables :

$R_{Q,k} = 175 \text{ kN}$

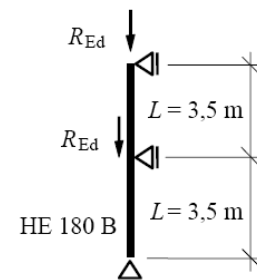


Figure 1 : Système Statique

**Coefficients partiels de sécurité :**  $\gamma_G = 1,35$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_M = 1,00$

#### Données pour le calcul au feu

Propriétés du matériau de protection incendie – Ciment de vermiculite projeté

Épaisseur :  $d_p = 20 \text{ mm}$ , Densité :  $\rho_p = 550 \text{ kgm}^{-3}$ , Chaleur spécifique :  $c_p = 1100 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$

Conductivité thermique :  $\lambda_p = 0,12 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

#### Sollicitation à température normale

En partie inférieure du poteau, la sollicitation de calcul due aux charges est :

$$N_{Ed} = 2R_{Ed} = 2(R_{G,k}\gamma_G + R_{Q,k}\gamma_Q) = 2(185 \times 1,35 + 175 \times 1,5) = 1024,5 \text{ kN}$$

#### Calcul à température normale

Le profilé HEB 180 est calculé pour résister aux charges appliquées. EN 1993-1-1 §5.5

Il s'agit d'une section de Classe 1.

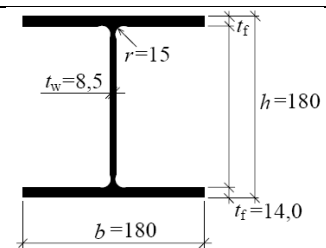
La longueur de flambement du poteau est prise égale à :

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 3,5 \text{ m}$$

Le flambement par rapport à l'axe z est le plus défavorable.

L'effort normal critique élastique pour le calcul à température normale est :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 1363 \times 10^4}{3500^2} = 2306 \text{ KN}$$



L'élancement réduit est obtenu par :

$$\lambda_z = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{6530 \times 355}{2306 \times 10^3}} = 1,003$$

Le coefficient de réduction pour le flambement d'un profilé laminé à chaud avec un rapport  $h/b < 1,2$  est calculé à partir de la courbe c (facteur d'imperfection :  $\alpha = 0,49$ ).

$$\begin{aligned} \phi &= 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2) \\ \phi &= 0,5(1 + 0,49(1,003 - 0,2) + 1,003^2) = 1,2 \end{aligned}$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_z^2}} = \frac{1}{1.2 + \sqrt{1.2^2 - 1.003^2}} = 0.538$$

La section est vérifiée à l'Etat Limite Ultime pour le calcul à température Normale.

$$N_{b,Rd} = \chi_z \frac{A f_y}{\gamma_{M1}} = 0.538 \frac{6\,525 \times 355}{1,0} = 1246.2 kN > N_{Ed} = 1024.5 kN$$

La section est satisfaisante pour le calcul à température normale.

### Calcul en situation d'incendie

#### Sollicitations de calcul en situation d'incendie EN1991-1-2 §4.3.2

En utilisant la règle simplifiée de l'EN 1991-1-2, des actions en situation d'incendie peuvent être déterminées à partir des actions en situation normale.

En utilisant la règle simplifiée de l'EN 1991-1-2, des actions en situation D'incendie peuvent être déterminées à partir des actions en situation normale. On se réfère à la situation accidentelle pour la combinaison des actions Durant l'exposition au feu, où le coefficient  $\psi$  est pris égal à  $\psi_{2,1} = 0,3$  pour des bâtiments de bureaux. Le coefficient de réduction pour le niveau de Charge de calcul est pris égal à :

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi Q_k}{G_k \gamma_G + Q_k \gamma_k} = \frac{185 + 0.3 \times 175}{1.35 \times 185 + 1.5 \times 175} = 0.464$$

$$N_{fi,Ed} = \eta_{fi} N_{ED} = 0.464 \times 1024.5 = 475.0 kN$$

**Note:** La valeur de  $\psi$  retenue pour cet exemple est la valeur Recommandée de EN1993-1-2 §2.4.2

#### Evaluation de la température des gaz

La courbe température-temps normalisée est utilisée pour la température des gaz. EN1991-1-2 §3.2.1 :

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

#### Evaluation de la température du poteau

La ligne en tirets de la **Figure 3** indique le périmètre de la section exposée au feu. Le facteur de massiveté est calculé de la façon suivante :

$$\left(\frac{A_p}{V}\right) = \frac{4b + 2(h - t_w - 4r)}{A} = \frac{4 \times 180 + 2 \times (180 - 8.5 - 4 \times 15) + 2\pi \times 15}{6525} = 0.159 mm^{-1}$$

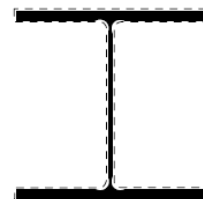
L'augmentation de température dans la section en acier est calculée suivant une procédure pas à pas à l'aide de la relation suivante :

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_p \rho_p} \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{1 + \frac{\phi}{3}} \Delta t - \left(e^{\frac{\phi}{10}} - 1\right) \Delta\theta_{g,t} \text{ mais } \Delta\theta_{a,t} \geq 0$$

$$\text{où } \phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V}$$

Un intervalle de temps  $\Delta t = 30$  secondes est utilisé pour le calcul de la température. Les températures de l'acier et des gaz sont présentées dans le Tableau 1 et à la **Figure 4**.

A partir des résultats présentés dans le Tableau 1, la température de l'acier à l'instant  $t = 90$  minutes est :  $\theta_a = 554^\circ C$ .



**Figure 3: Evaluation des facteurs de massiveté  $A_p/V$**

EXEMPLES D'APPLICATIONS

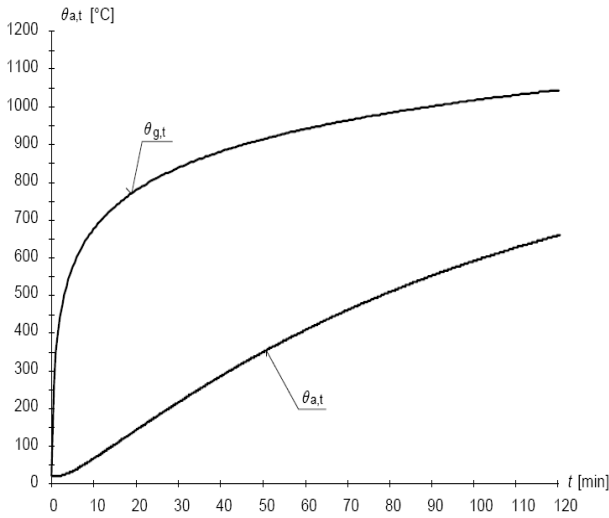


Figure 4: Courbes température-temps de l'acier et des gaz

min	sec	t min	$\theta_g$ °C	$c_a$ J/kg°C	$\phi$	$\Delta\theta_{a,t}$ °C	$\theta_{a,t}$ °C
	0	0	20,0	440			20,0
	30	0,500	261,1	440	0,557	0,0	20,0
1	00	1,000	349,2	440	0,557	0,0	20,0
1	30	1,500	404,3	440	0,557	0,0	20,0
2	00	2,000	444,5	440	0,557	0,0	20,0
2	30	2,500	476,2	440	0,557	0,7	20,7
3	00	3,000	502,3	440	0,557	1,4	22,0
88	00	88,000	1002,6	700	0,350	2,1	545,5
88	30	88,500	1003,5	702	0,349	2,1	547,6
89	00	89,000	1004,3	704	0,348	2,1	549,7
89	30	89,500	1005,2	706	0,347	2,1	551,7
90	00	90,000	1006,0	708	0,346	2,1	553,8
90	30	90,500	1006,8	710	0,345	2,1	555,8

Tableau 1: Calcul de la température dans l'acier

En alternative, la température du poteau en acier pourrait être calculée d'après le document SD005. Pour le facteur de massiveté  $A_p/V = 159 \text{ m}^{-1}$  et en tenant compte des propriétés du matériau de protection au feu, nous avons :

$$\frac{A_p \lambda_p}{V d_p} = 159 \frac{0.12}{0.02} = 954 \text{ WK}^{-1} \text{ m}^{-3}$$

La température de l'acier à l'instant  $t = 90$  minutes, est  $\theta_a = 602^\circ\text{C}$

La différence entre la température de l'acier déterminée suivant le calcul pas à pas de l'EN 1993-1-2 et celle obtenue à partir du document SD005 est due à l'hypothèse que  $\phi = 0$  (la capacité thermique du matériau de protection au feu est négligée) dans les données de calcul issues du document SD005. Prendre une température de calcul dans SD005 conduira donc à une estimation du côté de la sécurité, pour la résistance au feu d'un élément.

**Vérification dans le domaine de résistance**

**Classement de la section à température élevée**

L'élanement de la semelle comprimée est : EN 1993-1-2 §4.2.2

$$\frac{c}{t_f} = \frac{70.75}{14.00} = 5.05$$

La limite pour la Classe 1 est  $9\varepsilon$ . Pour la situation de calcul au feu,  $\varepsilon$  est pris égal à 0,85 fois sa valeur en calcul normal. Pour la nuance S355, la limite est donc :  $9 \times 0,85 \times 0,814 = 6,22 > 5,05$

La limite n'est pas dépassée, la semelle est donc de Classe 1.

L'élanement de l'âme en compression est

$$\frac{d}{t_w} = \frac{122.0}{8.5} = 14.35$$

La limite pour la Classe 1 est  $33\varepsilon$ . Pour la situation de calcul au feu,  $\varepsilon$  est pris égal à 0,85 fois sa valeur en calcul normal. La limite est donc :  $33 \times 0,85 \times 0,814 = 22,8 > 14,35$

La limite n'est pas dépassée. L'âme est donc de Classe 1. La section est de Classe 1 à température élevée. EN 1993-1-2 §3.2.1

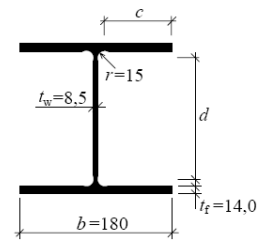


Figure 5: Classement de la section transversale

Les coefficients de réduction de la relation contrainte-déformation à la température  $\theta_a = 554^\circ\text{C}$  sont :  $k_{y,\theta} = 0,613$ ,  $k_{E,\theta} = 0,444$



A condition que le poteau étudié appartienne à une ossature contreventée et que la résistance au feu de la dalle en béton qui sépare les niveaux ne soit pas inférieure à celle du poteau, la longueur de flambement est réduite de la façon suivante :

$$L_{cr,y,fi} = L_{cr,z,fi} = 0.7xL = 0.7x3.5 = 2.45m$$

L'effort normal critique de flambement à température normale est donné par :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_{cr,z}} = \frac{3.14^2 x 210000 x 1363 x 10^4}{2450^2} = 4706kN$$

L'élançement réduit à température normale est :

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{6530x355}{4706.3x10^3}} = 0.702$$

L'élançement réduit à la température  $\theta_a$  est : [EN1993-1-2 § 4.2.3.2](#)

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} [k_{y,\theta} / k_{E,\theta}]^{0.5} = 0.702 [0.613 / 0.444]^{0.5} = 0.825$$

Le facteur d'imperfection  $\alpha$  est pris égal à :  $\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.65 \sqrt{\frac{235}{355}} = 0.53$

Le coefficient de réduction pour le flambement est alors :

$$\phi_{z,\theta} = 0.5 \left( 1 + \alpha \bar{\lambda}_{z,\theta} + \bar{\lambda}_{z,\theta}^2 \right) = 0.5 (1 + 0.53 x 0.825 + 0.825^2) = 1.058$$

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{\phi_{z,\theta} + \sqrt{\phi_{z,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{z,\theta}^2}} = \frac{1}{1.058 + \sqrt{1.058^2 - 0.825^2}} = 0.581$$

La résistance de calcul à la température  $\theta_a = 554^\circ\text{C}$  est donnée par :

$$N_{b,fi,\theta,Rd} = \chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.581 x 6525 x 0.613 x \frac{355}{1} = 825.0kN$$

L'effort axial de calcul est :  $N_{fi,Ed} = 475 kN$

$$N_{fi,Ed} = 475 kN < N_{b,fi,\theta,Rd} = 825kN$$

Par conséquent, la section est satisfaisante pour la situation de calcul au feu.

### Evaluation selon le document SD005

A des fins de comparaison, la résistance du poteau en acier basée sur la température de l'acier obtenue à partir du document SD005 est calculée :  $\theta_a = 602^\circ\text{C}$ . [SD005](#)

Les coefficients de réduction de la relation contrainte-déformation de l'acier à la température  $\theta_{a,max} = 602^\circ\text{C}$  sont :  $k_{y,\theta} = 0,465$ ,  $k_{E,\theta} = 0,306$  [SD003](#)

A condition que le poteau étudié appartienne à une ossature contreventée et que la résistance au feu de la dalle en béton qui sépare les niveaux ne soit pas inférieure à celle du poteau, la longueur de flambement est réduite de la façon suivante : [EN 1993-1-2 §4.2.3.2](#)

$$L_{cr,y,fi} = L_{cr,z,fi} = 0.7xL = 0.7x3.5 = 2.45m$$

A température normale, l'effort normal critique élastique est donné par :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_{cr,z}} = \frac{3.14^2 x 210000 x 1363 x 10^4}{2450^2} = 4706kN$$

## EXEMPLES D'APPLICATIONS

Dans ce cas, le calcul de  $\bar{\lambda}$  devrait être basé sur l'effort normal critique élastique pour une longueur de flambement égale à  $0,7L$ . L'élanement réduit à température normale est donné

$$\text{par : } \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{6530 \times 355}{4706.3 \times 10^3}} = 0.702$$

L'élanement réduit à la température  $\theta_a$  est : EN1993-1-2 § 4.2.3.2

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} [k_{y,\theta} / k_{E,\theta}]^{0.5} = 0.702 [0.465 / 0.306]^{0.5} = 0.865$$

Le facteur d'imperfection  $\alpha$  est pris égal à :  $\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.65 \sqrt{\frac{235}{355}} = 0.53$

Le coefficient de réduction pour le flambement est alors :

$$\phi_{z,\theta} = 0.5 \left( 1 + \alpha \bar{\lambda}_{z,\theta} + \bar{\lambda}_{z,\theta}^2 \right) = 0.5 (1 + 0.53 \times 0.865 + 0.865^2) = 1.103$$

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{\phi_{z,\theta} + \sqrt{\phi_{z,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{z,\theta}^2}} = \frac{1}{1.103 + \sqrt{1.103^2 - 0.865^2}} = 0.559$$

La résistance de calcul à la température  $\theta_a = 602^\circ\text{C}$  est calculé ainsi :

$$N_{b,fi,\theta,Rd} = \chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.559 \times 6525 \times 0.465 \times \frac{355}{1} = 602.6 \text{ kN}$$

L'effort axial de calcul est :  $N_{fi,Ed} = 475 \text{ kN}$

$$N_{fi,Ed} = 475 \text{ kN} < N_{b,fi,\theta,Rd} = 602.6 \text{ kN}$$

Par conséquent, la section est satisfaisante pour la situation de calcul au feu.

**Note :** L'approximation sécuritaire de la température de l'acier déterminée selon le document SD005 résulte en une réduction de 25% de la résistance en compression.

### Comparaison avec un calcul selon la résistance au feu normalisée et les données issues des fabricants

Pour une exposition de 90 minutes à la courbe température-temps normalisée, l'épaisseur de protection nécessaire peut être déterminée, pour une projection de vermiculite, à partir des tables de calcul des fabricants publiées dans « Protection au feu des bâtiments à ossature en acier ». Les tables de dimensionnement sont basées sur l'hypothèse que la température critique n'est pas inférieure à  $550^\circ\text{C}$ .

Facteur de massivité  $A_p/V = 159 \text{ m}^{-1}$

Épaisseur de protection  $d_p = 20 \text{ mm}$

#### Comparaison entre les méthodes

Méthode d'évaluation	Taux de travail $\mu_0$	résistance au feu
Température de l'acier et résistance déterminées selon l'EN 1993-1-2	$\frac{E_{fi,Ed}}{R_{fi,Ed,20}} = \frac{475}{1295} = 0.37$	$\frac{N_{fi,Ed}}{N_{b,fi,Rd}} = \frac{475}{825} = 0.58$
Température de l'acier déterminée d'après SD005 et résistance calculée selon l'EN 1993-1-2	$\frac{E_{fi,Ed}}{R_{fi,Ed,20}} = \frac{475}{1295} = 0.37$	$\frac{N_{fi,Ed}}{N_{b,fi,Rd}} = \frac{475}{602.6} = 0.79$
Utilisation des tables des fabricants	0.6	1

*Le taux de travail réel calculé pour le poteau (0,37) est beaucoup plus faible que la valeur nominale de 0,6 admise lorsqu'on utilise les données de calcul des fabricants. Avec l'EN 1993-1-2, l'épaisseur de matériau de protection au feu peut être réduite si l'on compare à l'épaisseur déterminée suivant les données des fabricants.*