

CHAPITRE 5

Vérification aux Eurocodes d'une poutre d'une toiture terrasse accessible en situation d'incendie

La justification d'une poutre en situation d'incendie exige la vérification à l'état limite ultime (ELU) uniquement. La vérification à l'état limite de service (ELS) n'est pas exigée. La première étape consiste à définir les actions, c'est-à-dire les charges de structure et les charges d'exploitation. Il faut ensuite déterminer les combinaisons d'actions en situation d'incendie, qui simulent les différentes situations de charge auxquelles la poutre sera soumise pendant l'incendie. L'étape suivante consiste à définir la section résiduelle. Puis les contraintes de flexion et de cisaillement sont calculées avec les combinaisons d'actions et la section résiduelle.

1 Hypothèses de calcul

Dans une pièce destinée à la restauration de 16×8 m, trois poutres supportent une toiture terrasse accessible avec le même usage. Le bâtiment est situé en zone A2 à une altitude de 1 100 m. Le complexe d'étanchéité et le caillebotis de la terrasse pèsent 50 kg/m^2 (sont inclus le plancher et les solives). Les trois poutres partagent la pièce en quatre zones de surface égale soit $16/4 = 4$ m par 8 m (figure 5.1). Les poutres sont en bois lamellé-collé classé GL28h, de section 110×900 mm, avec une masse volumique de 460 kg/m^3 . La durée de tenue au feu est d'une demi-heure.

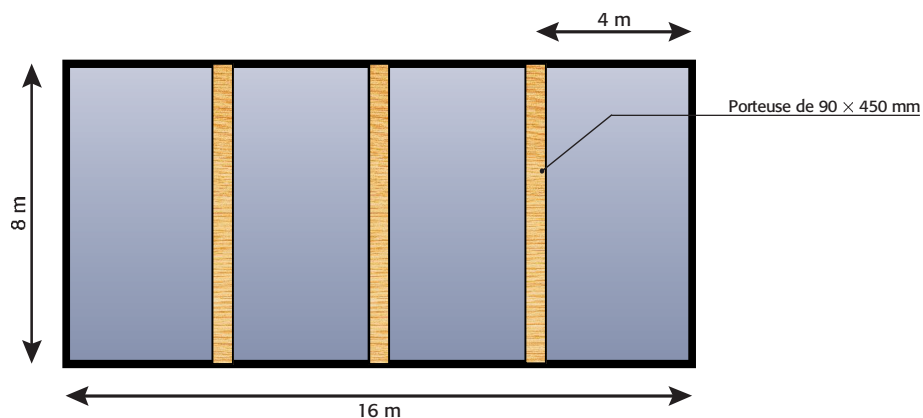


Figure 5.1 Porteuse de la salle de restaurant.

2 Détermination des actions

Les actions (ou charges pour cet exemple) proviennent du poids de la structure, de l'entretien et du poids de la neige.

2.1 Actions provoquées par le poids de la structure

Elles sont définies en trois étapes.

2.1.1 Étape 1 : déterminer la bande de chargement

La poutre reprend 1/2 entraxe à gauche et 1/2 entraxe à droite, soit un entraxe complet: $2000 + 2000 = 4000$ mm.

2.1.2 Étape 2 : transformer la masse en charge

Le calcul consiste à transformer la masse des éléments surfaciques (complexe d'étanchéité et le caillebotis) en action exprimées en kN/m^2 et la masse des éléments linéiques (poutre) en action exprimées en kN/m . Par simplification, l'accélération terrestre g est prise égale à 10 m/s^2 .

Complexe d'étanchéité et caillebotis

Masse surfacique: 50 kg/m^2 .

Nous obtenons: $\text{kg/m}^2 \times \frac{g}{1000} = \text{kN/m}^2$, soit $50 \times \frac{10}{1000} = 0,5 \text{ kN/m}^2$.

Poutre

Masse volumique: 460 kg/m^3 .

Nous obtenons: $\frac{\text{kg/m}^3 \times g}{1000} \times h \times e = \text{kN/m}$.

avec:

- h : hauteur (m);
- e : épaisseur (m).

Soit: $\frac{460 \times 10}{1000} \times 0,900 \times 0,110 = 0,455 \text{ kN/m}$.

2.1.3 Étape 3 : déterminer la charge de structure G par mètre de poutre

La charge de structure surfacique est multipliée par la bande de chargement pour obtenir une charge linéique. Le poids de la poutre est ajouté.

Charge de structure par mètre de poutre:

$$G = 0,5 \times 4 + 0,455 = 2,455 \text{ kN/m}$$

2.2 Charges d'exploitation

Pour notre exemple, la charge d'exploitation correspond à l'usage du bâtiment, un local public de type C1 (locaux avec table), soit une charge de $2,5 \text{ kN/m}^2$. La charge d'entretien d'une toiture terrasse n'est pas pris en compte car sa valeur de $0,8 \text{ kN/m}^2$ est nettement moins importante. Les charges d'exploitation sont rappelées dans le tableau 5.1.

La charge d'exploitation surfacique est multipliée par la bande de chargement pour obtenir une charge linéique.

Charge d'exploitation par mètre de poutre:

$$Q = 2,5 \times 4 = 10 \text{ kN/m}$$

Remarques:

- Les vérifications à l'état limite ultime et à l'état limite de service sont effectuées avec la charge uniformément répartie q_k puis avec la charge concentrée Q_k .
- Pour les locaux des catégories A, B, C3 et D1, la charge uniformément répartie q_k est minorée par le coefficient $\alpha_A = 0,77 + A_0 / A \leq 1$ avec $A_0 = 3,5 \text{ m}^2$ lorsque l'élément étudié reprend une surface supérieure à $15,2 \text{ m}^2$.
- Les charges des équipements importants sont précisées dans le cahier des clauses techniques particulières (CCTP) de l'opération de construction.
- Les charges d'exploitation de la catégorie H sont des charges d'entretien. Elles ne doivent pas être cumulées avec les actions de la neige ou du vent mais être prises en compte lors de la vérification de la déformation à l'état limite de service.

Tableau 5.1 Valeurs des charges d'exploitation en fonction du bâtiment
(source: NF P 061112/A1, clause 6.3.1.2(1)P, tableau 6.2)

Catégorie	q_k (kN/m ²)	Q_k (kN)
A – Logement		
Plancher	1,5	2
Escalier	2,5	2
Balcon	3,5	2
B – Bureau		
Bureau	2,5	4
C – Locaux publics		
C1 – Locaux avec table (école, restaurant,...)	2,5	3
C2 – Locaux avec sièges fixes (théâtre, cinéma,...)	4	4
C3 – Locaux sans obstacles à la circulation (musée, salles d'exposition)	4	4
C4 – Locaux pour activités physiques (dancing, salles de gymnastique,...)	5	7
C5 – Locaux susceptibles d'être surpeuplés (salles de concert, terrasses,...)	5	4,5
D – Commerces		
D1 – Commerces de détails courants	5	5
D2 – Grands magasins	5	7
E – Aires de Stockage et locaux industriels		
E1 – Surfaces de stockage (Entrepôts, bibliothèques,...)	7,5	7
E2 – Usage industriel	Cf. CCTP	
H – Toitures		
Si pente $\leq 15\%$ + étanchéité	0,8*	1,5
Autres toitures	0	1,5
I – Toitures accessibles		
Pour les usages des catégories A à D	Charges identiques à la catégorie de l'usage	
Si aménagement paysager	≥ 3	
(*) q_k sur une surface rectangulaire (A × B) de 10 m ² telle que $0,5 \leq A / B$.		

2.3 Charges de neige

Une toiture terrasse (sans accumulation de neige) a une charge de neige S définie par la formule:

$$s = s_k \cdot \mu_{f(\alpha)} \cdot c_e \cdot c_t$$

avec:

- s_k : valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol (voir ci-après);
- μ_f : coefficient de forme appliqué à la charge de neige (voir ci-après);
- c_e : coefficient d'exposition au vent; généralement égal à 1, il peut prendre la valeur de 1,25 lorsque le vent ne déplace pratiquement plus la neige, la toiture étant très abritée (clause 5.2(7) de la norme NF EN 199113/NA);

- c_t : coefficient thermique; $c_t = 1$, les bâtiments chauffés étant aujourd'hui systématiquement isolés. Ce coefficient peut diminuer la charge de neige uniquement dans de très rares cas.

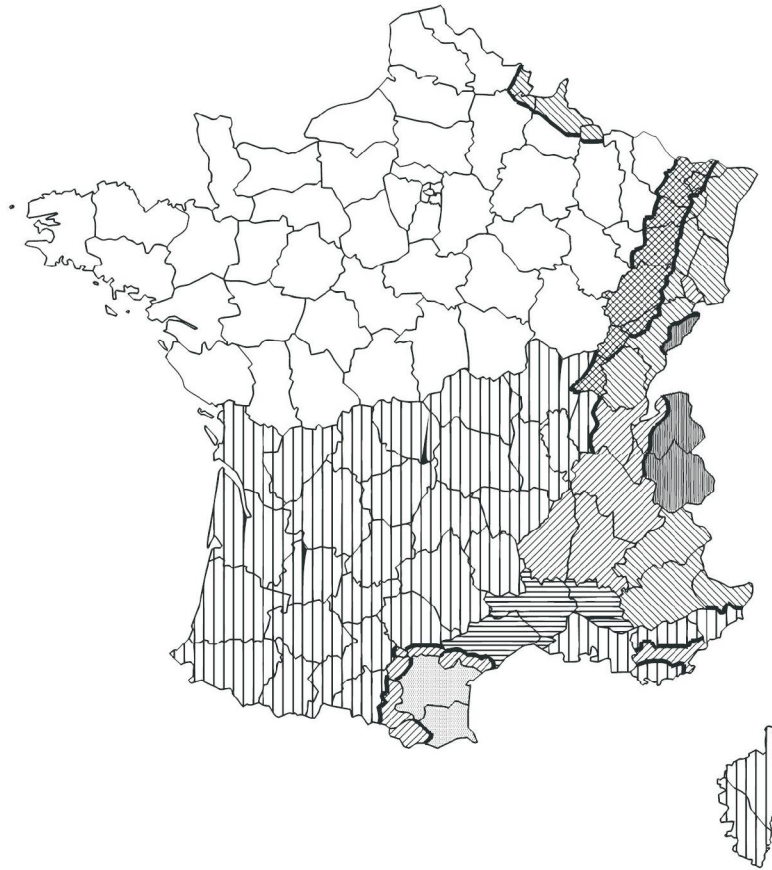
En situation accidentelle, une charge de neige s répond à l'équation suivante :

$$s = s_{Ad} \cdot \mu_{r(\alpha)} \cdot c_e \cdot c_t$$

Dans ce cas, s_{Ad} est la valeur de la charge exceptionnelle de neige sur le sol, exprimée en kN/m^2 .

2.3.1 Charge de neige sur le sol S_k

L'Eurocode 1 fournit une carte de France qui précise la charge de neige sur le sol (figure 5.2).



Régions :	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D	E
Valeur caractéristique (S_k) de la charge de neige sur le sol à une altitude inférieure à 200 m :	0,45	0,45	0,55	0,55	0,65	0,65	0,90	1,40
Loi de variation de la charge caractéristique pour une altitude supérieure à 200 :	Δs_1						Δs_2	

Figure 5.2 Carte de France des valeurs des charges de neige (source : NF EN 199113/NA).

Remarques

- La valeur de la charge neige accidentelle est indépendante de l'altitude.
- La valeur totale de neige S (S provenant de « snow ») est obtenue en faisant la somme de la valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol S_k et de l'augmentation de la charge ΔS_1 ou ΔS_2 lorsque l'altitude est supérieure à 200 m : $S = S_k + \Delta S_1$ ou $S = S_k + \Delta S_2$.

2.3.2 Coefficient de forme μ_i

Le coefficient de forme μ_i est défini dans le paragraphe 5.3.2 de la norme NF EN 199113 (tableau 5.2).

Tableau 5.2 Coefficients μ_i pour une toiture sans dispositif de retenue de la neige.

Angle α du toit (degré)	$0 < \alpha \leq 30$	$30 < \alpha \leq 60$	$\alpha \geq 60$
μ_1 (toiture à 1 ou 2 versants)	0,8	$0,8 (60 - \alpha) / 30$	0
μ_2 (toiture à versants multiples)	$0,8 + (0,8\alpha / 30)$	1,6	

Remarques

- Si des éléments (barre à neige, acrotères...) empêchent la neige de glisser, μ_1 est pris égal à 0,8.
- Les accumulations de neige sont définies dans les annexes des normes NF EN 199113 et NF EN 199113/NA.

Pour notre exemple, le bâtiment a une toiture sensiblement horizontale. Il est situé en zone A2 à une altitude inférieure de 1 100 m. Les coefficients d'exposition C_e et thermique C_t sont égaux à 1.

2.3.3 Calcul des charges de neige sur la toiture terrasse

La charge de neige est calculée en quatre étapes.

Étape 1: calcul de la neige au sol

$$s_{1100} = 0,45 + \frac{3,5 \times 1100}{1000} - 2,45 = 1,85 \text{ kN/m}^2$$

Étape 2: calcul coefficient de forme μ_i

Pour un l'angle inférieur à 30°, le tableau 2 indique $\mu_1 = 0,8$.

Étape 3: calcul de la charge de neige sur la toiture en kN/m² horizontal

La formule de calcul de neige sur une toiture est :

$$s = s_k \cdot \mu_{i(\alpha)} \cdot c_e \cdot c_t$$

$$s_{1100} = 1,85 \times 0,8 \times 1 \times 1 = 1,48 \text{ kN/m}^2 \text{ horizontal}$$

Étape 4: calcul de la charge de neige sur la poutre en kN/m

$$s_{1100} = 1,48 \times 4 = 5,92 \text{ kN/m}$$

3 Combinaisons d'actions à l'état limite ultime (ELU) en situation d'incendie

Pour notre exemple les combinaisons à l'ELU concernent la résistance de la structure. La formule générale est :

$$q = G + \Psi_{1,1}Q_1 + \sum_{i=2}^{\infty} \Psi_{2,i}Q_i$$

Soit pour deux charges variables :

$$q = G + \Psi_{1,1}Q_1 + \Psi_{2,2}Q_2$$

Avec $Q_1 = Q$ et $Q_2 = S$, nous obtenons (cf. tableau 5.3) :

$$\begin{aligned} q_1 &= G + \Psi_1 Q + \Psi_2 S \\ q_1 &= G + 0,7Q + 0,2S \\ q_1 &= 2,455 + 0,7 \times 10 + 0,2 \times 5,92 \\ q_1 &= 10,639 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Avec $Q_1 = S$ et $Q_2 = Q$, nous obtenons (cf. tableau 5.3) :

$$\begin{aligned} q_2 &= G + \Psi_1 S + \Psi_2 Q \\ q_2 &= G + 0,5S + 0,6Q \\ q_2 &= 2,455 + 0,5 \times 5,92 + 0,6 \times 10 \\ q_2 &= 11,415 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Tableau 5.3 Coefficients statistiques
(source : NF EN 1990/A1/NA Tableau A2.1).

Charges	Ψ_0 Action variable d'accompagnement	Ψ_1 Combinaison accidentelle (incendie)	Ψ_2 Fluage et combinaison accidentelle
Charges d'exploitation des bâtiments			
Catégorie A : habitations résidentielles	0,7	0,5	0,3
Catégorie B : bureaux	0,7	0,5	0,3
Catégorie C : lieux de réunion	0,7	0,7	0,6
Catégorie D : commerce	0,7	0,7	0,6
Catégorie E : stockage	1	0,9	0,8
Catégorie H : toits	0	0	0
Charges de neige			
Altitude > 1 000 m	0,7	0,5	0,2
Altitude ≤ 1 000 m	0,5	0,2	0
Action du vent			
	0,6	0,2	0

4 Vérification à l'état limite ultime (ELU) en situation d'incendie

La vérification à l'ELU en situation d'incendie consiste à vérifier les contraintes de flexion et de cisaillement avec une section réduite par l'incendie pendant une durée de 30 minutes, nommée section efficace. Ces contraintes sont comparées aux contraintes de résistances spécifiques à la situation d'incendie. Pour notre exemple, deux cas de figure seront examinés: la poutre déverse ou ne déverse pas car elle est maintenue par la toiture terrasse.

La combinaison d'actions retenue est $q_2 = G + 0,5S + 0,6Q$, soit une charge de 11,415 kN/m. En situation d'incendie, la résistance du bois est indépendante de la durée de l'action, l'examen de la première combinaison est donc inutile car la charge est plus faible.

4.1 Calcul de la section efficace lorsque les faces ne sont pas protégées

La section efficace est la section non carbonisée qui reste après la durée de tenue au feu, soit 15, 30 et, plus rarement, 60 ou 90 minutes. Elle s'obtient en retranchant à la section initiale l'épaisseur carbonisée.

Lorsque deux faces sont exposées à la flamme, l'épaisseur efficace est:

$$b_{fi} = b_{init} - 2(k_0 \cdot d_0 + \beta_n \cdot t)$$

Lorsqu'un chant est exposé à la flamme, la hauteur efficace est:

$$h_{fi} = h_{init} - (k_0 \cdot d_0 + \beta_n \cdot t)$$

avec:

- b_{init} : largeur initiale, en mm;
- h_{init} : hauteur initiale, en mm;
- $k_0 \cdot d_0$: épaisseur additionnelle dont on suppose une rigidité et une résistance nulle:
 - k_0 est mentionné dans le tableau 5.4. Il dépend de la durée de tenue au feu demandé $t_{fi,req}$, en minute;
 - $d_0 = 7$ mm.
- $\beta_n \cdot t$: épaisseur carbonisée, en mm:
 - β_n : vitesse de combustion qui inclut l'effet des arrondis en coin et des fentes, en mm/min. Sa valeur est précisée dans le tableau 5.5;
 - β_0 : vitesse de combustion qui n'inclut pas l'effet des arrondis en coin et des fentes, notamment pour les panneaux (cf. le tableau 5.5), en mm/min;
 - t : la durée d'exposition à la flamme, en minutes.

Lorsque deux faces et un chant sont exposés à la flamme, nous obtenons pour une tenue au feu de 30 minutes:

$$b_{fi} = 110 - 2(1 \times 7 + 0,7 \times 30) = 54 \text{ mm}$$

$$h_{fi} = 900 - (1 \times 7 + 0,7 \times 30) = 872 \text{ mm}$$

Remarque: l'indice « fi » provient du terme anglais « fire ». Il précise que l'on est en situation d'incendie.

Tableau 5.4 Détermination de k_0
(source : NF EN 1995-1-2 Tableau 4.1).

Faces non protégées	$t_{fi,req} < 20 \text{ min}$	$k_0 = t_{fi,req} / 20$
	$t_{fi,req} > 20 \text{ min}$	$k_0 = 1$

Tableau 5.5 Vitesse de carbonisation conventionnelle
(source : NF EN 1995-1-2 Tableau 3.1)

Matériau	ρ_k Masse volumique caractéristique	β_n ou β_0 pour les panneaux (mm/min)
Bois résineux et hêtre massif avec une épaisseur $\geq 35 \text{ mm}$	$\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,8
Bois résineux lamellé-collé	$\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,7
Bois feuillu massif ou lamellé-collé	$\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,7
	$\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,55
LVL	$\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,7
Contreplaqué (hp : épaisseur de 20 mm)	450 kg/m ³	1,0
Panneaux à base de bois (hp : épaisseur de 20 mm)	450 kg/m ³	0,9

Lorsque l'épaisseur des panneaux h_p et/ou la masse volumique des panneaux dérivés du bois est différente la vitesse de combustion est donné par :

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 \cdot \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \cdot \sqrt{\frac{20}{h_p}}$$

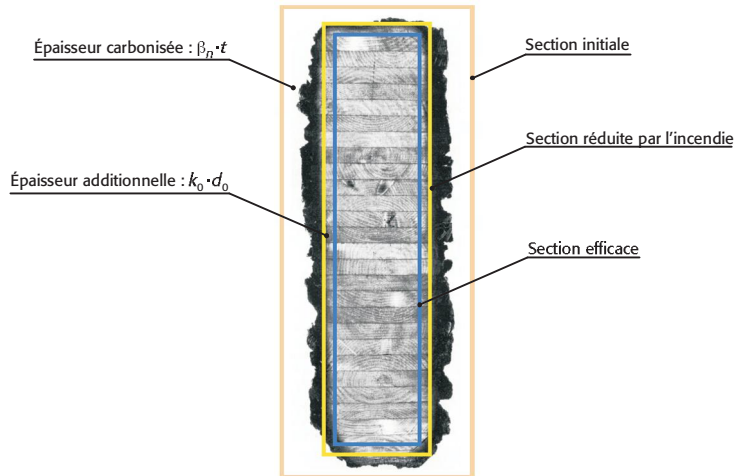


Figure 5.3 Section efficace.

4.2 Vérification en flexion sans risque de déversement

Il n'y a pas de risque de déversement si les solives maintiennent pendant 30 minutes la partie supérieure de la poutre (section des solives suffisamment importante, plafond les protégeant...). Si cette condition n'est pas remplie, il faut tenir compte du coefficient d'instabilité (cf. § 4.3).

La contrainte de flexion provoquée par les actions doit rester inférieure à la contrainte de résistance de flexion déterminée.

Le taux de travail est :

$$\frac{\sigma_{m,d,fi}}{k_{crit,fi} f_{m,d,fi}} \leq 1$$

avec :

- $\sigma_{m,d,fi}$: contrainte de flexion provoquée par les actions en situation d'incendie, en N/mm^2 ;
- $f_{m,d,fi}$: contrainte de résistance de flexion calculée en situation d'incendie, en N/mm^2 ;
- $k_{crit,fi} = 1$ pour notre exemple, coefficient d'instabilité provenant du déversement en situation d'incendie.

4.2.1 Contrainte provoquée par les actions $\sigma_{m,d,fi}$

La contrainte de flexion provoquée par la charge est calculée avec la formule suivante :

$$\sigma_{m,d,fi} = \frac{M_{y,fi}^f}{\frac{I_{G,y,fi}}{V}}$$

avec :

- $M_{y,fi}^f$: moment de flexion maximum ; pour une poutre sur deux appuis avec une charge uniformément répartie, $M_{y,fi}^f = q_{fi} L^2/8$;
- $q_{fi} = 11,415 \text{ N}/\text{mm}$: charge linéique de poutre en situation d'incendie ;
- $L = 8000 \text{ mm}$: distance entre appuis ;
- $I_{G,y,fi}/V$: module d'inertie de la section efficace ; $bh^2/6$ pour une section rectangulaire avec le repère de la figure 5.4.

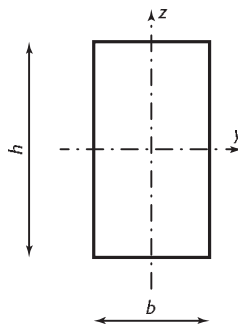


Figure 5.4 Repère de la section adopté par l'Eurocode.

Soit pour notre exemple :

$$\sigma_{m,d,fi} = \frac{Mf_{y,fi}}{I_{G,y,fi}} = \frac{6q_{fi}L^2}{8b_{fi}h_{fi}^2} = \frac{6 \times 11,415 \times 8000^2}{8 \times 54 \times 872^2} = 13,4 \text{ N/mm}^2$$

4.2.2 Contrainte de résistance du bois $f_{m,d}$

La contrainte de résistance du bois dépend de la contrainte caractéristique au fractile à 20 %, de l'effet système et de la plus grande dimension de la section. Les tableaux 5.7 et 5.8 présentent les contraintes caractéristiques de flexion $f_{m,k}$. La contrainte de résistance du bois $f_{m,d,fi}$ répond à l'équation suivante :

$$f_{m,d,fi} = k_{fi} \times f_{m,k} \times \frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} \times k_{sys} \times k_h$$

avec :

- $k_{fi} = 1,15$: coefficient qui permet de transformer une valeur caractéristique du fractile à 5 % au fractile à 20 % défini dans le tableau 5.6 (cf. figures 5.5 et 5.6) ;
- $f_{m,k} = 28 \text{ N/mm}^2$: contrainte caractéristique de résistance en flexion ;
- $k_{mod} = 1$: coefficient modificatif en situation d'incendie ;
- $\gamma_M = 1$: coefficient partiel qui vaut 1 en situation accidentelle, donc d'incendie ;
- $k_{sys} = 1$: le coefficient d'effet système est égal à 1,1 lorsque plusieurs éléments porteurs de même nature et de même fonction avec un entraxe inférieur à 1,2 m (solives, fermettes) sont sollicités par un même type de chargement réparti uniformément et avec un système capable de reporter les efforts sur les pièces adjacentes. Lorsque ces conditions ne sont pas remplies, l'entraxe est de 4 m, $k_{sys} = 1$;
- $k_h = 1,07$: coefficient de hauteur. Le coefficient k_h est égal à 1 lorsque la hauteur de la poutre est supérieure à 600 mm. Le coefficient k_h majore les résistances pour les hauteurs inférieures à 150 mm pour le bois massif et 600 mm pour le bois lamellé-collé. Le risque de défauts cachés dans la structure du bois est moins important pour les petites sections que pour les grandes.

Tableau 5.6 Coefficient pour transformer une valeur caractéristique du fractile à 5 % au fractile à 20 % (source : NF EN 1995-1-2 Tableau 2.1).

Matériau	k_{fi}
Bois massif	1,25
Bois lamellé-collé	1,15
Panneaux à base de bois	1,15
LVL	1,1
Assemblages sollicités en cisaillement avec éléments latéraux en bois ou en panneaux à base de bois	1,15
Assemblages sollicités en cisaillement avec éléments latéraux métalliques	1,05
Assemblages sollicités axialement	1,05

Tableau 5.7 Valeurs caractéristiques des bois massifs résineux et de peuplier
(source : NF EN 338).

Symbole	Désignation	Unité	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
$f_{m,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
$f_{t,0,k}$	Contrainte de traction axiale		8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
$f_{t,90,k}$	Contrainte de traction transversale		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$f_{c,0,k}$	Contrainte de compression axiale		16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
$f_{c,90,k}$	Contrainte de compression transversale		2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
$f_{v,k}$	Contrainte de cisaillement		3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4	4	4	4	4	4
$E_{0,mean}$	Module moyen d'élasticité axiale	kN/mm ²	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
$E_{0,05}$	Module élasticité axial au 5 ^e pourcentile		4,7	5,4	6	6,4	6,7	7,4	7,7	8	8,7	9,4	10	10,7
$E_{90,mean}$	Module moyen d'élasticité transversale		0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
G_{mean}	Module moyen de cisaillement		0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1
ρ_k	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
ρ_{mean}	Masse volumique moyenne		350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

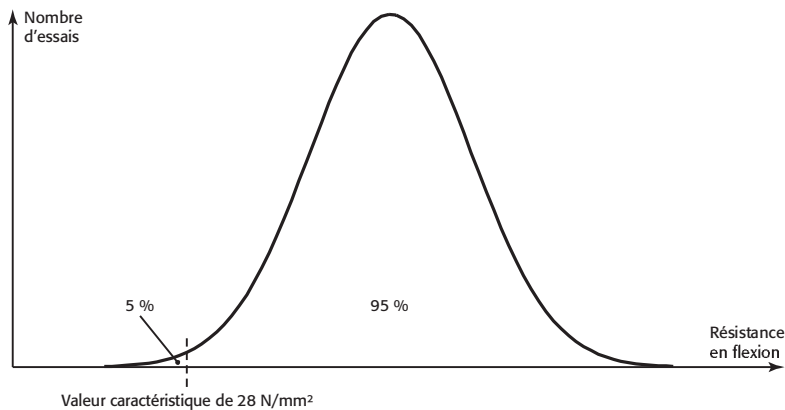


Figure 5.5 Valeur caractéristique au fractile à 5 % de la contrainte de flexion du bois lamellé-collé classé GL28h.

Tableau 5.8 Valeurs caractéristiques des bois lamellés
 (source : NF EN 1194).

Symbole	Désignation	Classe de résistance du bois lamellé-collé						
		GL20h	GL22h	GL24h	GL26h	GL28h	GL30h	GL32h
$f_{m,g,k}$	Résistance à la flexion	20	22	24	26	28	30	32
$f_{t,0,g,k}$	Résistance à la traction	16	17,6	19,2	20,8	22,4	24	25,6
$f_{t,90,g,k}$		0,5						
$f_{c,0,g,k}$	Résistance à la compression	20	22	24	26	28	30	32
$f_{c,90,g,k}$		2,5						
$f_{v,g,k}$	Résistance au cisaillement (cisaillement et torsion)	3,5						
$f_{r,g,k}$	Résistance au cisaillement roulant	1,2						
$E_{0,g,moyen}$	Module d'élasticité	8 400	10 500	11 500	12 100	12 600	13 600	14 200
$E_{0,g,05}$		7 000	8 800	9 600	10 100	10 500	11 300	11 800
$E_{90,g,moyen}$		300						
$E_{90,g,05}$		250						
$G_{g,moyen}$	Module de cisaillement	650						
$G_{g,05}$		540						
$G_{r,g,moyen}$	Module de cisaillement roulant	65						
$G_{r,g,05}$		54						
$\rho_{g,k}$	Masse volumique	340	370	385	405	425	430	440
$\rho_{g,moyen}$		370	410	420	445	460	480	490

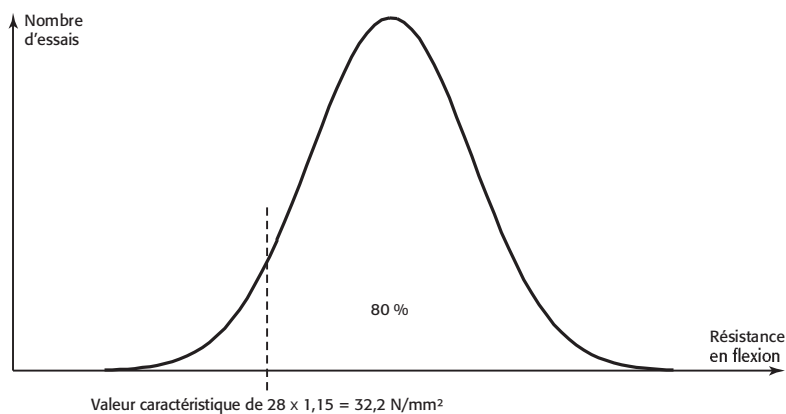


Figure 5.6 Valeur caractéristique au fractile à 20 % de la contrainte de flexion du bois lamellé-collé classé GL28h.

4.2.3 Calcul des coefficients de hauteur

Bois massif

$$\begin{aligned} \text{Si } h \geq 150 \text{ mm} & \quad k_b = 1 \\ \text{Si } h \leq 150 \text{ mm} & \quad k_b = \min [1,3;(150/h)^{0,2}] \end{aligned}$$

Bois lamellé-collé

$$\begin{aligned} \text{Si } h \geq 600 \text{ mm} & \quad k_b = 1 \\ \text{Si } h \leq 600 \text{ mm} & \quad k_b = \min [1,1;(600/h)^{0,1}] \end{aligned}$$

Pour notre exemple, $k_b = 1$, car $h \geq 600$ mm, avec h la hauteur de la pièce (mm).

Nous obtenons :

$$f_{m,d,fi} = 1,15 \times 28 \times \frac{1}{1} \times 1 \times 1 = 32,2 \text{ N/mm}^2$$

4.2.4 Taux de travail

Le taux de travail est :

$$\frac{\sigma_{m,d,fi}}{k_{crit} \cdot f_{m,d,fi}} = \frac{13,4}{1 \times 32,2} = 0,42 \leq 1, \text{ le critère est vérifié.}$$

4.3 Vérification en flexion avec un risque de déversement

Le déversement est un flambement latéral de la membrure comprimée. Il peut apparaître lorsque celle-ci n'est pas maintenue (partie supérieure de la poutre pour notre exemple), lorsque les appuis sont limités en torsion (sabot, encastrement dans un mur, etc.) et si l'élanement est important, c'est-à-dire lorsque le rapport hauteur/épaisseur est élevé. Le coefficient $k_{crit,fi}$ est calculé à partir de la contrainte critique de flexion $\sigma_{m,crit,fi}$ et de l'élanement relatif de flexion $\lambda_{rel,m,fi}$.

4.3.1 Calcul de la contrainte critique $\sigma_{m,crit,fi}$

La contrainte critique de flexion est définie par la formule :

$$\sigma_{m,crit,fi} = \frac{0,78 \cdot E_{0,05} \cdot b_{fi}^2}{b_{fi} (l \cdot k_{lef} + \Delta l)}$$

avec :

- $E_{0,05} = 10\,500 \text{ N/mm}^2$: module axial au 5^e percentile (ou caractéristique), tableau 5.8;
- $b_{fi} = 872 \text{ mm}$: hauteur de la pièce efficace;
- $b_{fi} = 54 \text{ mm}$: épaisseur de la pièce efficace;
- $l = 8\,000 \text{ mm}$: longueur de la pièce;
- $\Delta l = 2 \times 872 = 1\,744 \text{ mm}$; lorsque la pièce est chargée sur sa fibre comprimée, l_{ef} est augmentée de la valeur $2h$; si la pièce est chargée sur sa partie tendue, l_{ef} est diminuée de $0,5h$;
- $k_{lef} = 0,9$: ce coefficient est défini dans le tableau 5.9.

Il s'ensuit que :

$$\sigma_{m,crit,fi} = \frac{0,78 \times 10500 \times 54^2}{872(8000 \times 0,9 + 2 \times 872)} = 3,06 \text{ N/mm}^2$$

Tableau 5.9 Valeurs du coefficient k_{le} en fonction du type de charge et d'appui.

Type d'appui	Type de chargement	Coefficient
Appuis simples	Charge répartie	0,9
	Charge concentrée	0,8
Porte-à-faux	Charge répartie	0,5
	Charge concentrée	0,8

Calcul de l'élanement relatif de flexion $\lambda_{rel,m}$

L'élanement relatif de flexion est défini par la formule suivante :

$$\lambda_{rel,m,fi} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit,fi}}}$$

avec :

- $\sigma_{m,crit,fi} = 3,06 \text{ N/mm}^2$: contrainte critique de flexion ;
- $f_{m,k} = 28 \text{ N/mm}^2$: contrainte de flexion caractéristique.

Par suite :

$$\lambda_{rel,m,fi} = \sqrt{\frac{28}{3,06}} = 3,02$$

Calcul du coefficient k_{crit}

Si $\lambda_{rel,m,fi} \leq 0,75$ alors $k_{crit,fi} = 1$: il n'y a pas de déversement.

Si $0,75 < \lambda_{rel,m,fi} \leq 1,4$ alors $k_{crit,fi} = 1,56 - 0,75 \lambda_{rel,m,fi}$.

Si $\lambda_{rel,m,fi} > 1,4$ alors $k_{crit,fi} = 1/\lambda_{rel,m,fi}^2$.

Nous obtenons : $k_{crit,fi} = 1/3,02^2 = 0,11$.

Le taux de travail devient :

$$\frac{\sigma_{m,d,fi}}{k_{crit,fi} \cdot f_{m,d,fi}} = \frac{13,4}{0,11 \times 32,2} = 3,8 > 1, \text{ le critère n'est plus vérifié.}$$

4.4 Cisaillement

La contrainte de cisaillement provoquée par les actions en situation d'incendie doit rester inférieure à la contrainte de résistance de cisaillement déterminée en situation d'incendie.

Le taux de travail est :

$$\frac{\tau_{d,fi}}{f_{v,d,fi}} \leq 1$$

avec :

- $\tau_{d,fi}$: contrainte de cisaillement provoquée par les actions en situation d'incendie (N/mm²);
- $f_{v,d,fi}$: contrainte de résistance de cisaillement en situation d'incendie (N/mm²).

4.4.1 Contrainte provoquée par les actions $\tau_{d,fi}$

La contrainte de cisaillement provoquée par la charge est calculée par la formule :

$$\tau_{d,fi} = \frac{k_f \times F_{v,d,fi}}{k_{cr} \times b_{fi} \times h_{ef,fi}}$$

avec :

- $k_f = 1,5$: coefficient de forme de la section pour une section rectangulaire;
- $F_{v,d,fi}$: effort tranchant exprimé en N; une poutre sur deux appuis avec une charge uniformément répartie a un effort tranchant maximum au voisinage des appuis, soit $q_{fi} L/2 = 11,415 \times 8\,000/2 = 45\,660$ N;
- $h_{ef,fi} = 872$ mm, hauteur efficace exposée au cisaillement;
- $b_{fi} = 54$ mm, épaisseur efficace de la pièce;
- $k_{cr} = 1/$ ce coefficient tient compte du risque de fente aux extrémités de la poutre. Il est défini dans le tableau 5.10. Les charges de structure sont inférieures à 70 % des charges totales ($2,455/(2,455+10) = 0,20$).

Tableau 5.10 Valeur de k_{cr} en fonction du matériau, de la section et du chargement
(source : NF EN 199511/A1).

Matériaux	Classe de service		
	1	2	3
Bois massif dont la hauteur ≤ 150 mm	1	1	0,67
Bois massif dont la hauteur > 150 mm	0,67	0,67	0,67
Bois lamellé-collé avec moins de 70 % de charge permanente par rapport à la charge totale	1	1	0,67
Bois lamellé-collé avec au moins 70 % de charge permanente par rapport à la charge totale	1	0,67	0,67

Nous obtenons :

$$\tau_{d,fi} = \frac{1,5 \times 45\,660}{1 \times 54 \times 872} = 1,46 \text{ N/mm}^2$$

4.4.2 Contrainte de résistance du bois $f_{v,d,fi}$

La contrainte de résistance du bois dépend de la contrainte caractéristique au fractile à 20 %. Les tableaux 5.7 et 5.8 présentent les contraintes caractéristiques de cisaillement $f_{v,k}$. La contrainte de résistance du bois répond à l'équation suivante :

$$f_{v,d,fi} = k_{fi} \times f_{v,f} \times \frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}}$$

avec :

- $k_{fi} = 1,15$: coefficient qui permet de transformer une valeur caractéristique du fractile à 5 % au fractile à 20 % défini dans le tableau 5.6 (cf. figures 5.5 et 5.6) ;
- $f_{v,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$: contrainte caractéristique de résistance en cisaillement ;
- $k_{mod,fi} = 1$: coefficient modificatif en situation d'incendie ;
- $\gamma_{M,fi} = 1$: coefficient partiel qui vaut 1 en situation accidentelle, donc d'incendie.

Nous obtenons :

$$f_{v,d,fi} = 1,15 \times 3,5 \times \frac{1}{1} = 4 \text{ N/mm}^2$$

4.4.3 Taux de travail

Le taux de travail est :

$$\frac{\tau_{d,fi}}{f_{v,d,fi}} = \frac{1,46}{4} = 0,37 < 1, \text{ le critère est vérifié.}$$