

Vérification aux eurocodes d'un poteau supportant une poutre maîtresse

La justification d'un poteau exige des vérifications à l'état limite ultime (ELU). La première étape consiste à définir les actions, les charges de structure, les charges d'exploitation (entretien) et les charges climatiques. Ensuite, il faut déterminer les combinaisons d'actions : elles simulent les différentes situations de charge auxquelles le poteau sera soumis au cours de sa vie. Ces combinaisons d'actions permettent de calculer à l'état limite ultime (ELU) les contraintes de compression axiale en excluant le risque de flambage. La déformation étant extrêmement faible (raccourcissement), il n'est pas nécessaire de vérifier l'état limite de service (ELS).

> Sommaire

- 1 • Hypothèses de calcul
- 2 • Détermination des actions
- 3 • Combinaisons d'actions
- 4 • Sections de calcul
- 5 • Vérifications à l'état limite ultime (ELU)
- 6 • Conclusion
- 7 • Bibliographie

1 Hypothèses de calcul

Dans un salon long de 8 m, un poteau supporte une porteuse qui soutient une toiture-terrasse non accessible, végétalisée de type intensif, sensiblement horizontale. Le poteau est situé au milieu de la porteuse.

Le poteau a une section de 100×200 mm. Il est en bois massif reconstitué (BMR) classé C24.

Le complexe de la toiture végétalisée pèse jusqu'à 390 kg/m^2 lorsqu'il pleut. Située au milieu de la pièce, la porteuse en bois lamellé-collé classé GL24h, de section 90×450 mm, est longue de 6 m ; sa masse volumique est de 440 kg/m^3 (fig. 1).

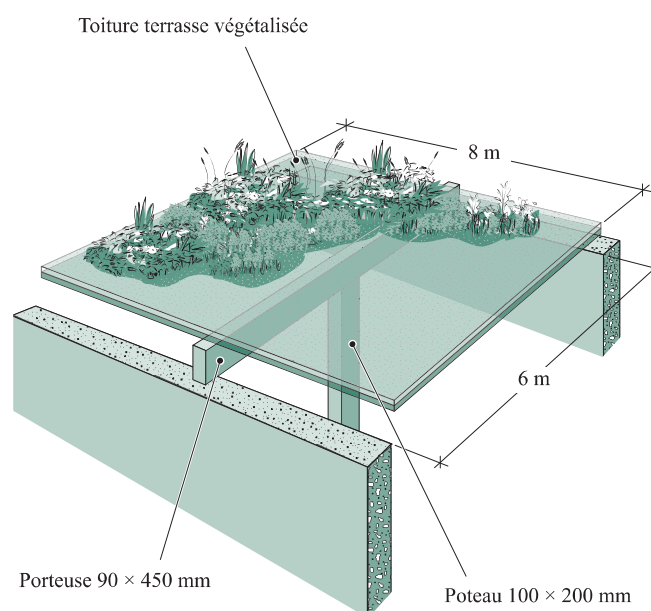


Fig. 1. Poteau du salon.

Yves Benoit

Yves Benoit est professeur au lycée des Métiers du Bâtiment (LMB) à Felletin, dans la Creuse. Il dispense des cours en BTS « Systèmes constructifs bois et habitats » et est formateur en entreprise. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages aux éditions Eyrolles. Professionnel et amateur passionné du bois, il a notamment écrit Construction de maisons à ossature bois, Les Parquets – Guide technique et réglementaire, Le Guide des essences de bois et des ouvrages destinés à un public plus large tel que Coffret de reconnaissance des bois de France et Le Grand livre de la machine à bois combinée.

Le bâtiment se situe en zone A1 à une altitude de 180 m.

2 Détermination des actions

Le poteau étant l'appui intermédiaire de la porteuse, il faut déterminer les charges par mètre de porteuse pour ensuite définir la charge reprise par le poteau.

2.1 Actions provoquées par le poids de la structure



Références

- NF EN 1991-1-1 (mars 2003 – indice de classement : P 06-111-1) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-1 : actions générales – Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments – 3^e tirage de novembre 2009.
- NF P 06-111-2/A1 (mars 2009 – indice de classement : P 06-111-2/A1) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-1 : actions générales – Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments – Annexe nationale à la norme NF EN 1991-1-1 – Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments.

2.1.1 Étape 1 : détermination de la bande de chargement reprise par la porteuse

La porteuse est située au milieu de la pièce. L'entraxe entre les murs et la porteuse est de $8\ 000/2 = 4\ 000$ mm. Elle reprend un demi-entraxe à gauche et un demi-entraxe à droite, soit un entraxe complet : $4\ 000/2 + 4\ 000/2 = 4\ 000$ mm.

2.1.2 Étape 2 : transformation de la masse en charge

Le calcul consiste à transformer la masse du complexe de la toiture végétalisée en action (kN/m^2) et la masse des éléments linéique (la porteuse) en action (kN/m).



Remarque

Par simplification, l'accélération terrestre g est prise égale à $10\ \text{m/s}^2$.

$$\text{– calcul de l'action du complexe : } 390 \times \frac{10}{1\ 000} = 3,9\ \text{kN/m}^2$$

$$\text{– calcul de l'action de la porteuse : } \frac{440 \times 10}{1\ 000} \cdot 0,450 \times 0,090 = 0,178\ \text{kN/m}$$

2.1.3 Étape 3 : détermination de la charge de structure G par mètre de porteuse

La charge de structure surfacique multipliée par la bande de chargement permet d'obtenir une charge linéique. Le poids de la porteuse est ensuite ajouté.

La valeur de la charge totale est donc :

$$G = 3,9 \times 4 + 0,178 = 15,778\ \text{kN/m}$$

2.2 Charges d'exploitation



Références

- NF EN 1991-1-1 (mars 2003 – indice de classement : P 06-111-1) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-1 : actions générales – Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments. 3^e tirage, novembre 2009.
- NF EN 1991-1-1/NA (juin 2004 – indice de classement : P 06-111-2) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-1 : Actions générales – Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments. Annexe nationale à la NF EN 1991-1-1.
- NF P 06-111-2/A1 (mars 2009 – indice de classement : P 06-111-2/A1) : Eurocode 1 – actions sur les structures – Partie 1-1 : actions générales – Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments.

La charge d'exploitation correspond à la charge due à l'entretien. Puisque la toiture est une toiture-terrasse, il faut appliquer une charge de $0,8\ \text{kN/m}^2$ sur un rectangle le plus défavorable de $10\ \text{m}^2$ tel que le rapport de la longueur sur la largeur soit inférieur à 2 (clause 6.3.4.1 de l'annexe nationale).

La bande de chargement est large de $4\ \text{m}$; l'autre côté du rectangle est de $10 / 4 = 2,5\ \text{m}$; le rapport $4 / 2,5 = 1,6$ est donc bien inférieur à 2.

La charge d'exploitation $Q_{\text{entretien}}$ par mètre sur une longueur de $2,5\ \text{m}$ située au milieu de la porteuse est calculée comme suit :

$$Q_{\text{entretien}} = 0,8 \times 4 = 3,2\ \text{kN/m}$$

2.3 Charges de neige



Références

- NF EN 1991-1-3 (avril 2004 – indice de classement : P 06-113-1) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-3 : actions générales – Charges de neige.
- NF EN 1991-1-3/NA (mai 2007 – indice de classement : P 06-113-1/NA) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-3 : actions générales – Charges de neige – Annexe nationale à la norme NF EN 1991-1-3 – Actions générales – Charges de neige.

Une toiture-terrasse ou à deux versants sans accumulation de neige a une charge de neige s (kN/m^2 horizontal de toiture) définie par la formule :

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

avec :

s_k : valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol (kN/m^2) ;

μ_r : coefficient de forme appliqué à la charge de neige ;

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

ment plus la neige, la toiture étant très abritée (clause 5.2(7) de la norme NF EN 1991-1-3/NA) ;

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

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 (fig. 2).

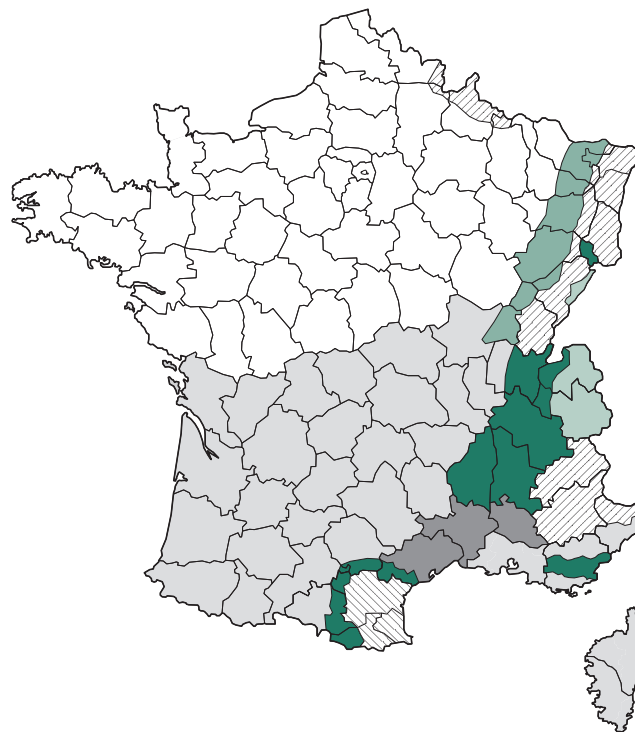
Remarques

- La valeur de la charge neige accidentelle est indépendante de l'altitude.
- La valeur totale de la charge de neige est obtenue en ajoutant la valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol S_k

Le bâtiment est situé à une altitude de 180 m dans la zone A1 :

$$S_{180} = S_{200}$$

$$S_{180} = 0,45 \text{ kN/m}^2 \text{ sol}$$



Régions	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D	E
Valeurs caractéristiques (S_k) de la charge de neige sur un sol à une altitude inférieure à 200 m	0,45	0,45	0,55	0,55	0,65	0,65	0,90	1,40
Valeurs de la charge de neige exceptionnelle (S_{Ad}) sur un sol	-	1,00	1,00	1,35	-	1,35	1,80	-
Augmentation de la charge lorsque l'altitude est supérieure à 200 m	Δs_1						Δs_2	

(charges en KN/m²)

Altitude A	Δs_1	Δs_2
de 200 à 500 m	A/1 000 - 0,20	1,5 A/1 000 - 0,30
de 500 à 1 000 m	1,5 A/1 000 - 0,45	3,5 A/1 000 - 1,30
de 1 000 à 2 000 m	3,5 A/1 000 - 2,45	7 A/1 000 - 4,80

Fig. 2. Carte de France des valeurs des charges de neige (source : NF EN 1991-1-3/NA).

avec :

S_{180} : valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol à une altitude de 180 m (kN/m²).

S_{200} : valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol à une altitude de 200 m (kN/m²).

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 1991-1-3 (tab. 1).



Remarques

- Si des éléments (barre à neige, acrotères...) empêchent la neige de glisser, μ_i est pris égal à 0,8.
- Les accumulations de neige sont définies dans les annexes des normes NF EN 1991-1-3 et NF EN 1991-1-3/NA.

La toiture est une toiture-terrasse avec un angle proche de 0°. Pour un l'angle inférieur à 30° : $\mu_{1(21,8^\circ)} = 0,8$.

2.3.3 Charge de neige sur la toiture-terrasse (kN/m² horizontal)

La charge de neige sur la toiture-terrasse est de :

$$s = 0,45 \times 0,8 \times 1 \times 1 = 0,36 \text{ kN/m}^2 \text{ horizontal}$$

La bande de chargement de la porteuse ayant une longueur de 4 m, la charge de neige est :

$$s = 0,36 \times 4 = 1,44 \text{ kN/m}$$



Remarques

- Il n'y a pas de neige exceptionnelle dans la zone A1 (fig. 2).
- La distribution de la neige par le vent n'a pas d'intérêt puisque la toiture est horizontale.

2.4 Effets du vent



Références

- NF EN 1991-1-4 (novembre 2005 – indice de classement : P 06-114-1) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4 : actions générales – Actions du vent.
- NF EN 1991-1-4/A1 (octobre 2010 – indice de classement : P 06-114-1/A1) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4 : actions générales – Actions du vent.

- NF EN 1991-1-4/NA (mars 2008 – indice de classement : P 06-114-1/NA) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4 : actions générales – Actions du vent – Annexe nationale à la norme NF EN 1991-1-4 de 2005 – Actions générales – Actions du vent.

Le calcul manuel de l'effet du vent W , exprimé kN/m² ou en kN/m, sur un bâtiment avec l'Eurocode 1 est complexe et lourd. Avec un logiciel, les résultats sont les suivants :

- valeur moyenne de dépression extérieure W : $-0,303 \text{ kN/m}^2$; soit, avec une bande de chargement de 4 m :

$$W = -0,303 \times 4 = -1,212 \text{ kN/m}$$

- valeur moyenne de surpression extérieure W : $+0,043 \text{ kN/m}^2$.

Cette action peut être négligée puisque la résistance du bois est plus importante pour une charge instantanée : le vent, que pour une charge de court terme : la neige.

3 Combinaisons d'actions



Références

- NF EN 1990 (mars 2003 – indice de classement : P 06-100-1) : Eurocode 0 – Eurocodes structureaux – Bases de calcul des structures.
- NF EN 1990/A1 (juillet 2006 – indice de classement : P 06-100-1/A1) : Eurocode 0 – Bases de calcul des structures.
- NF EN 1990/A1/NA (décembre 2007 – indice de classement : P 06-100-1/A1/NA) : Eurocode 0 – Bases de calcul des structures – Annexe nationale à la norme NF EN 1990/A1 de 2006.

Une première vérification permet de confirmer que, pendant toute la durée d'exploitation du bâtiment, la sécurité des personnes est assurée : c'est la vérification à l'état limite ultime (ELU). Le raccourcissement du poteau est très faible (de l'ordre du dixième de mm). La déformation étant négligée, il n'est pas nécessaire de la vérifier à l'état limite de service (ELS).

Les combinaisons d'actions permettent de simuler les situations que rencontrera le bâtiment pendant son exploitation. En fonction de la situation du bâtiment et des vérifications réalisées, les actions sont pondérées et additionnées. Pour un bâtiment courant, les coefficients sont définis sur des bases statistiques correspondant à un usage de 50 ans. Les combinaisons sont différentes pour chaque situation :

- la résistance de la structure (STR) ;
- la vérification au soulèvement (EQU) ;
- la vérification des situations accidentelles (inexistante pour la neige car le bâtiment est en zone A1 ; la vérification au feu sera réalisée dans un prochain article).

Tab. 1. Coefficients μ_i pour une toiture sans dispositif de retenue de la neige (source : NF EN 1991-1-3).

Angle α du toit (°)	$0 < \alpha \leq 30$	$30 < \alpha \leq 60$	$\alpha \geq 60$
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	

L'expression générale permettant de calculer les combinaisons est donnée par la figure 3 (NF EN 1990, clause 6.4.3) :

$$q = \gamma_G G + \gamma_Q Q_1 + \sum_{n=2}^{\infty} \psi_{0,i} \gamma_Q Q_i$$

Action permanente
Action variable de base
Action(s) variable(s) d'accompagnement

↑
↑
↑
↑

Coefficient partiel de l'action permanente
Coefficient partiel de l'action variable
Facteur statistique
Coefficient partiel de l'action variable

q : action de calcul
 G : action permanente
 Q : action variable

Fig. 3. Expression générale permettant de calculer les combinaisons à l'ELU.

Remarque

– L'opérateur « + » signifie « fonctionne ensemble » : par exemple, les charges de structure et les effets du vent. Ce n'est pas une addition traditionnelle.

Les combinaisons sont exprimées différemment selon l'approche choisie :

– combinaison pour la résistance de la structure à des charges descendantes ELU(STR) :

$$q = \gamma_{G,sup} G + \gamma_Q Q_1 + \sum_{n=2}^{\infty} \Psi_{0,i} \gamma_Q Q_i$$

– combinaison pour la résistance au soulèvement ELU(STR et EQU) :

$$q = \gamma_{G,inf} G + \gamma_Q W$$

Remarques

- $\gamma_{G,inf}$ prend la valeur 0,9 à l'ELU(STR) et 1 à l'ELU(EQU).
- Les actions s'opposant au soulèvement ne sont pas prises en compte.

Les valeurs des coefficients partiels et des coefficients statistiques sont précisées dans les tableaux 2 et 3.

Tab. 2. Coefficients partiels de l'action permanente pour un bâtiment courant (durée indicative d'utilisation de 50 ans).

Type d'action	Coefficient partiel
<i>Permanente</i> :	
– (STR) : $\gamma_{G,sup}$	1,35
– (STR) : $\gamma_{G,inf}$	1
– (EQU) : $\gamma_{G,inf}$	0,9
<i>Variable</i> (STR) : γ_Q	1,5

Tab. 3. Coefficients statistiques en fonction des catégories de bâtiment et de l'altitude.

	Action variable d'accompagnement ψ_0	Combinaison accidentelle (incendie) ψ_1	Fluage et combinaison accidentelle ψ_2
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	0,3	0
Action du vent			
	0,6	0,2	0

3.1 Combinaisons des charges descendantes pour la résistance de la structure ELU (STR)

La seule charge de structure (ou permanente) conduit à la combinaison suivante :

$$q_1 = \gamma_{G,\text{sup}} G$$

$$q_1 = 1,35G$$

$$q_1 = 1,35 \times 15,778 = 21,3 \text{ kN/m}$$

avec :

q_1 : valeur de la charge de calcul de la première combinaison (kN/m) ;

$\gamma_{G,\text{sup}}$: coefficient partiel de l'action permanente (tab. 2) ;

G : valeur de la charge permanente (structure) (kN/m).

En combinant la charge de structure et la charge de neige, on obtient la combinaison :

$$q_2 = \gamma_{G,\text{sup}} G + \gamma_Q Q_1$$

$$q_2 = 1,35G + 1,5S$$

$$q_2 = 1,35 \times 15,778 + 1,5 \times 1,44 = 23,16 \text{ kN/m}$$

avec :

q_2 : valeur de la charge de calcul de la deuxième combinaison (kN/m) ;

$\gamma_{G,\text{sup}}$: coefficient partiel de l'action permanente (tab. 2) ;

G : valeur de la charge permanente (structure) (kN/m) ;

γ_Q : coefficient partiel de l'action variable (tab. 2) ;

Q_1 : valeur de la charge variable (neige) (kN/m) ;

S : valeur de la charge de neige (kN/m).

En combinant la charge de structure et la charge d'entretien, on obtient la combinaison :

$$q_3 = \gamma_{G,\text{sup}} \cdot G + \gamma_Q \cdot Q_{\text{entretien}}$$

$$q_3 = 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot Q_{\text{entretien}}$$

avec :

q_3 : valeur de la charge de calcul de la troisième combinaison (kN/m) ;

$G = 15,778 \text{ kN/m}$ (§ 2.1.3) ;

$Q_{\text{entretien}} = 3,2 \text{ kN/m}$ (§ 2.2).



Remarques

– L'action permanente G s'applique sur toute la longueur de la porteuse mais la charge d'exploitation due à l'entretien, $Q_{\text{entretien}}$, est sur 2,5 m au milieu de la porteuse. L'effet de ces deux actions étant différent, il ne faut pas les additionner.

– La charge d'entretien $Q_{\text{entretien}}$ ne se combine pas avec les autres actions variables. Le coefficient ψ_0 (facteur statistique de l'action variable d'accompagnement) du tableau 3 est nul.

3.2 Combinaisons pour la résistance au soulèvement ELU (STR)

En combinant la charge de structure et l'effet du vent en dépression, on obtient la combinaison :

$$q = \gamma_{G,\text{inf}} G + \gamma_Q W_-$$

$$q = 1G + 1,5W_-$$

$$q = 1 \cdot 15,778 - 1,5 \cdot 1,212 = 13,96 \text{ kN/m}$$

avec :

q : valeur de la charge de calcul (kN/m) ;

$\gamma_{G,\text{inf}}$: coefficient partiel de l'action permanente (tab. 2) ;

G : valeur de la charge permanente (structure) (kN/m) ;

γ_Q : coefficient partiel de l'action variable (tab. 2) ;

W_- : valeur de l'effet du vent (kN/m).

La valeur de la charge de calcul q reste positive. Il n'y a pas de risque d'arrachement de la porteuse donc ni du poteau. Il n'est pas nécessaire de justifier un assemblage vis-à-vis de l'arrachement.

3.3 Combinaisons pour la stabilité vis-à-vis du soulèvement ELU (EQU)

En combinant la charge de structure et l'effet du vent en dépression, on obtient la combinaison :

$$q = \gamma_{G,\text{inf}} G + \gamma_Q W_-$$

$$q = 0,9G + 1,5W_-$$

$$q = 0,9 \times 15,778 - 1,5 \times 1,212 = 12,383 \text{ kN/m}$$

avec :

q : valeur de la charge de calcul (kN/m) ;

$\gamma_{G,\text{inf}}$: coefficient partiel de l'action permanente (tab. 2) ;

G : valeur de la charge permanente (structure) (kN/m) ;

γ_Q : coefficient partiel de l'action variable (tab. 2) ;

W_- : valeur de l'effet du vent (kN/m).

La valeur de la charge de calcul q reste positive. Il n'y a pas de risque de soulèvement de la porteuse donc ni du poteau. Il n'est pas nécessaire de réaliser un assemblage vis-à-vis du soulèvement.

4 Sections de calcul

Le bois massif reconstitué est séché avant le collage des lames, puis raboté. L'humidité du bois lors de la fabrication du poteau est voisine de celle qu'il aura lors de sa mise en œuvre, soit 12 %. Il n'est pas nécessaire de diminuer la section.

5 Vérifications à l'état limite ultime (ELU)



Références

- NF EN 1995-1-1 (novembre 2005 – indice de classement : P 21-711-1) : Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-1 : généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments – 2^e tirage (septembre 2006) – Modifié par amendement A1 (octobre 2008).
- NF EN 1995-1-1/NA (mai 2010 – indice de classement : P 21-711-1/NA) : Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-1 : généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments – Annexe nationale à la norme NF EN 1995-1-1.

Les vérifications à l'ELU portent sur la résistance en compression axiale et le risque de flambement du poteau.

5.1 Calcul de la charge reprise par le poteau et section de calcul

La porteuse repose sur trois appuis, le poteau étant l'appui intermédiaire. Pour définir la charge transmise au poteau, il faut appliquer la formule :

$$N = \frac{10ql}{8}$$

avec :

- N : effort normal (ou de compression) repris par le poteau (N) ;
- q : charge par mètre de porteuse, défini suivant la combinaison d'actions considérée (N/mm) ;
- l : distance entre deux travées, soit $6\,000/2 = 3\,000$ mm.

Les tableaux 4 et 5 précisent l'effort normal repris par le poteau en fonction du cas de charge et de la combinaison d'actions.

5.2 Compression axiale avec risque de flambement

La contrainte de compression axiale $\sigma_{c,0,d}$ provoquée par les actions doit rester inférieure à la contrainte de résistance de compression axiale $f_{c,0,d}$, diminuée par un coefficient d'instabilité lié au risque de flambement :

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_c \times f_{c,0,d}$$

Le taux de travail est calculé comme suit (formule 6.24 de la norme NF EN 1995-1-1) :

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

avec :

$\sigma_{c,0,d}$: contrainte de compression axiale provoquée par les actions (N/mm²) ;

$f_{c,0,d}$: contrainte de résistance de compression axiale de résistance (N/mm²) ;

k_c : coefficient d'instabilité lié au risque de flambement.

5.2.1 Contrainte provoquée par les actions, $\sigma_{c,0,d}$

La contrainte de compression axiale est définie par la formule :

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N}{A}$$

avec :

N : effort normal provoquant de la compression (N) ;

$A = 200 \times 120$, aire de la pièce (mm²).

Le tableau 6 précise la valeur de la contrainte de compression axiale en fonction de l'effort normal.

Tab. 4. Effort normal repris par le poteau en fonction du cas de charge.

Cas de charge	Effort sur la porteuse (N/mm)	Effort normal sur le poteau (N)
G	15,778	$N = \frac{10 \cdot 15,778 \cdot 3\,000}{8} = 59\,167,5$
S	1,44	$N = \frac{10 \cdot 1,44 \cdot 3\,000}{8} = 5\,400$
$Q_{\text{entretien}}$	$Q_{\text{entretien}} = 3,2$ sur 2,5 m	Résolution sur ordinateur car la charge n'est pas uniformément répartie : 7 378

Tab. 5. Effort normal repris par le poteau en fonction de la combinaison d'actions.

Combinaison à l'ELU	Effort normal sur le poteau (N)
1,35 G	79 875
1,35 G + 1,5 S	87 975
1,35 G + 1,5 $Q_{\text{entretien}}$	90 943

Tab. 6. Contrainte de compression axiale reprise par le poteau en fonction de la combinaison d'actions.

Combinaison à l'ELU	Effort normal sur le poteau (N)	Contrainte de compression axiale (N/mm ²)
1,35G	79 875	$\sigma_{c,0,d} = \frac{79\,875}{200 \times 100} = 4$
1,35G + 1,5S	87 975	$\sigma_{c,0,d} = \frac{87\,975}{200 \times 100} = 4,5$
1,35G + 1,5Q _{entretien}	Résolution sur ordinateur car la charge d'entretien n'est pas uniformément répartie : 90 943	$\sigma_{c,0,d} = \frac{90\,943}{200 \times 100} = 4,6$

5.2.2 Contrainte de résistance du bois $f_{c,0,d}$

La contrainte de résistance du bois dépend de la contrainte caractéristique, de la classe de service (humidité du bois) et de la charge de plus courte durée de la combinaison d'actions (tab. 7).

$$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

(formule 2.14 de la norme NF EN 1995-1-1)

avec :

$f_{c,0,k} = 21$ N/mm², contrainte caractéristique de résistance en compression axiale pour un résineux classé C24 (tab. 7) ;

k_{mod} : coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée de la combinaison d'actions et de la classe de service (tab. 9) ;
 $\gamma_M = 1,3$, coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau (tab. 10).

Le tableau 8 présente les valeurs caractéristiques du bois lamellé-collé.

Le tableau 11 précise la valeur de la contrainte de résistance en compression axiale en fonction de la durée de charge.

5.2.3 Coefficient de flambement k_c

Étape 1 : sélection de l'élancement mécanique du poteau par rapport aux axes z et y

L'élancement mécanique est défini par la formule :

$$\lambda = \frac{l_f}{i}$$

avec :

$l_f = m \cdot l_g$, longueur de flambement (mm) ;

$m = 1$, influence des assemblages des extrémités sur la longueur de flambement précisée dans le tableau 12 ;

$l_g = 2\,500$ mm, longueur du poteau.

Tab. 7. Valeurs caractéristiques des bois massifs résineux et de peuplier (source : NF EN 338).

Symbole	Désignation	Unité	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
$f_{m,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	14	16	18	22	24	27	30	35	40
$f_{t,0,k}$	Contrainte de traction axiale		8	10	11	13	14	16	18	21	24
$f_{t,90,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire		0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
$f_{c,0,k}$	Contrainte de traction axiale		16	17	18	20	21	22	23	25	26
$f_{c,90,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire		2,0	2,2	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
$f_{v,k}$	Contrainte de cisaillement		1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8
$E_{0,mean}$	Module moyen axial	kN/mm ²	7	8	9	10	11	11,5	12	13	14
$E_{0,05}$	Module axial au 5 ^e pourcentile		4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4
$E_{90,mean}$	Module moyen transversal		0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47
G_{mean}	Module de cisaillement		0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88
ρ_k	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	290	310	320	340	350	370	380	400	420
ρ_{mean}	Masse volumique moyenne		350	370	380	410	420	450	460	480	500

Tab. 8. Valeurs caractéristiques des bois lamellés (source : NF EN 1194).

Symbole	Désignation	Unité	Lamellés collés homogènes				Lamellés collés panachés			
			GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
$f_{m,g,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	24	28	32	36	24	28	32	36
$f_{t,0,g,k}$	Contrainte de traction axiale		16,5	19,5	22,5	26,0	14,0	16,5	19,5	22,5
$f_{t,90,g,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire		0,40	0,45	0,50	0,60	0,35	0,40	0,45	0,50
$f_{c,0,g,k}$	Contrainte de traction axiale		24	26,5	29	31	21	24	26,5	29
$f_{c,90,g,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire		2,7	3,0	3,3	3,6	2,4	2,7	3,0	3,3
$f_{v,g,k}$	Contrainte de cisaillement		2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,2	3,8
$E_{0,g,mean}$	Module moyen axial	kN/mm ²	11,6	12,6	13,7	14,7	11,6	12,6	13,7	14,7
$E_{0,g,05}$	Module axial au 5 ^e pourcentile		9,4	10,2	11,1	11,9	9,4	10,2	11,1	11,9
$E_{90,g,mean}$	Module moyen transversal		0,39	0,42	0,46	0,49	0,32	0,39	0,42	0,46
$G_{g,mean}$	Module de cisaillement		0,75	0,78	0,85	0,91	0,59	0,72	0,78	0,85
$\rho_{g,k}$	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	380	410	430	450	350	380	410	430

Tab. 9. Valeur du facteur pour la durée de chargement k_{mod} du bois massif (source : NF EN 1995-1-1/A1).

Matériau	Norme	Classe de service	Classe de durée de chargement				
			Action permanente	Action long terme	Action moyen terme	Action court terme	Action instantanée
Bois massif, Bois lamellé-collé et lamibois	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Tab. 10. Valeur du coefficient γ_M (source : NF EN 1995-1-1/NA).

Matériaux	γ_M
Bois	1,3
Lamellé-collé	1,25
Lamibois (LVL), OSB	1,2

$i = \sqrt{\frac{l_c}{A}}$, avec le repère défini par l'Eurocode 5 dans la figure 4 :

$$i_z = \sqrt{\frac{l_{c,z}}{A}} = \sqrt{\frac{b^3 h}{12bh}} = \frac{b}{\sqrt{12}}$$

$$\text{et } i_y = \sqrt{\frac{l_{c,y}}{A}} = \sqrt{\frac{h^3 b}{12bh}} = \frac{h}{\sqrt{12}}$$

L'élançement devient :

$$\text{-- pour l'axe } z : \lambda_z = \frac{m \cdot l_g \cdot \sqrt{12}}{b} = \frac{1 \cdot 2\,500 \sqrt{12}}{100} = 86,6$$

$$\text{-- pour l'axe } y : \lambda_y = \frac{m \cdot l_g \cdot \sqrt{12}}{h} = \frac{1 \cdot 2\,500 \sqrt{12}}{200} = 43,3$$

Le risque de flambement est le plus grand pour l'élançement le plus important. Les calculs sont donc réalisés par rapport à l'axe z.

Étape 2 : vérification du risque de flambement avec le calcul de l'élongement relatif du poteau par rapport à l'axe z

L'élongement relatif est défini par la norme NF EN 1995-1-1 (formule 6.22) :

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

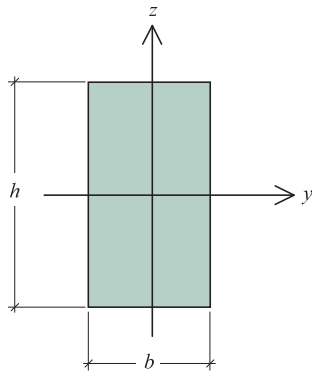


Fig. 4. Repère de la section adopté par l'Eurocode 5.

avec :

$f_{c,0,k} = 21 \text{ N/mm}^2$, contrainte caractéristique de résistance en compression axiale ;

$E_{0,05} = 7400 \text{ N/mm}^2$, module axial au 5^e pourcentile (ou caractéristique).

Soit :

$$\lambda_{rel,z} = \frac{86,6}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 1,47$$

Lorsque l'élongement relatif $\lambda_{rel, \max} > 0,3$ il y a un risque de flambage.

Étape 3 : calcul du coefficient d'instabilité lié au flambage par rapport à l'axe z

Pour définir le coefficient d'instabilité, il faut calculer un coefficient intermédiaire (formule 6.28 de la norme NF EN 1995-1-1) :

$$k_z = 0,5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2 \right]$$

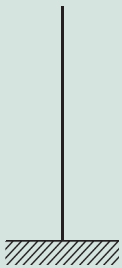

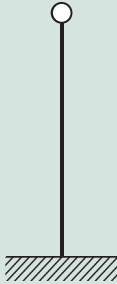
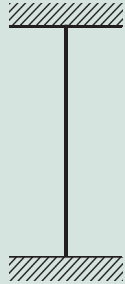
avec :

β_c : facteur de rectitude égal à 1 pour le bois lamellé-collé, le bois LVL et le bois massif reconstitué (défaut de rectitude $< 1/500$)

Tab. 11. Contrainte de résistance en compression axiale en fonction de la durée de charge.

Combinaison à l'ELU	Durée de la charge	Coefficient k_{mod}	Contrainte de résistance en compression axiale (N/mm ²)
1,35 G	Permanente	0,6	$f_{c,0,d} = 21 \times \frac{0,6}{1,3} = 9,7$
1,35 G + 1,5 S	Court terme (altitude $\leq 1\ 000 \text{ m}$)	0,9	$f_{c,0,d} = 21 \times \frac{0,9}{1,3} = 14,5$
1,35 G + 1,5 $Q_{entretien}$	Moyen terme	0,8	$f_{c,0,d} = 21 \times \frac{0,8}{1,3} = 12,9$

Tab. 12. Influence des assemblages des extrémités sur la longueur de flambement.

			
$m = 2$	$m = 1$	$m = 0,7$	$m = 0,5$
$L_f = 2 l_g$	$L_f = l_g$	$L_f = 0,7 l_g$	$L_f = 0,5 l_g$

de la portée) ; pour du bois massif, β_c serait égal à 0,2 (défaut de rectitude $< 1/300$ de la portée) (formule 6.29 de la norme NF EN 1995-1-1).

$$k_z = 0,5[1 + 0,1(1,47 - 0,3) + 1,47^2] = 1,64$$

Le coefficient d'instabilité est défini par la norme NF EN 1995-1-1 (formule 6.26) (tab. 12) :

$$k_{c,z} = \frac{1}{\left(k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}\right)}$$

soit :

$$k_{c,z} = \frac{1}{\left(1,64 + \sqrt{1,64^2 - 1,47^2}\right)} = 0,422$$

5.2.4 Taux de travail

Le taux de travail est calculé au moyen de la formule suivante (formule 6.24 de la norme NF EN 1995-1-1) :

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1$$

Le tableau 13 mentionne le taux de travail pour chaque combinaison d'actions.

Tab. 13. Taux de travail pour chaque combinaison d'actions.

Combinaison à l'ELU	Taux de travail
1,35G	$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} = \frac{4}{0,422 \times 9,7} = 0,98 \leq 1$
1,35G + 1,5S	$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} = \frac{4,5}{0,422 \times 14,5} = 0,74 \leq 1$
1,35G + 1,5Q _{entretien}	$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} = \frac{4,6}{0,422 \times 12,9} = 0,85 \leq 1$

6 Conclusion

Le critère est vérifié avec la combinaison dimensionnante 1,35G (poids propre de la structure uniquement), le bois perdant de sa résistance avec une charge permanente.

7 Bibliographie

- [1] NF EN 1990 (mars 2003 – indice de classement : P 06-100-1) : Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures.
- [2] NF EN 1990/A1 (2006 – indice de classement : P 06-100-1/A1) : Eurocode 0 – Bases de calcul des structures.
- [3] NF EN 1990/A1/NA (décembre 2007 – indice de classement : P06-100-1/A1/NA) : Eurocode 0 – Bases de calcul des structures – Annexe nationale à la norme NF EN 1990/A1 (2006).
- [4] NF EN 1991-1-1 (mars 2003 – indice de classement : P 06-111-1) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-1 : actions générales – Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments.
- [5] NF EN 1991-1-3 (avril 2004 – indice de classement : P 06-113-1) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-3 : actions générales – Charges de neige – 2^e tirage (octobre 2009).
- [6] NF EN 1991-1-3/NA (mai 2007 – indice de classement : P 06-113-1/NA) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-3 : actions générales – Charges de neige – Annexe nationale à la norme NF EN 1991-1-3.
- [7] NF EN 1991-1-4 (novembre 2005 – indice de classement : P 06-114-1) : Eurocode 1 : actions sur les structures – Partie 1-4 : actions générales – Actions du vent.
- [8] NF EN 1991-1-4/A1 (novembre 2010 – indice de classement : P 06-114-1/A1) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4 : actions générales – Actions du vent.
- [9] NF EN 1991-1-4/NA (mars 2008 – indice de classement : P 06-114-1/NA) : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4 : actions générales – Actions du vent – Annexe nationale à la norme NF EN 1991-1-4 (2005) – Actions générales – Actions du vent.
- [10] NF EN 1995-1-1 (novembre 2005 – indice de classement : P 21-711-1) : Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-1 : généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments – 2^e tirage (septembre 2006) – Modifié par amendement A1 (octobre 2008).
- [11] NF EN 1995-1-1/NA (mai 2010 – indice de classement : P 21-711-1/NA) : Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-1 : généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments – Annexe nationale à la norme NF EN 1995-1-1.



En savoir plus

Y. Benoit, B. Legrand, V. Tastet, *Calcul des structures en bois*, Collection « Eurocode », éd. Eyrolles, Afnor éd., 2009.