

Sommaire

Vérification aux Eurocodes d'une poutre courbe à inertie variable....	3
1 Hypothèses de calcul.....	3
2 Détermination des actions.....	3
2.1 Actions provoquées par le poids de la structure.....	3
2.2 Les charges de neige.....	4
3 Vérification à l'Etat Limite Ultime (ELU).....	5
3.1 Combinaison d'action retenue.....	5
3.2 Contrainte de flexion dans chaque zone à simple décroissance (1).....	5
3.2.1 Contrainte de flexion induite par la combinaison d'action $\sigma_{m,\alpha,d}$ en N/mm ²	5
3.2.2 Contrainte de résistance de flexion $f_{m,d}$ en N/mm ²	7
3.2.3 Coefficient d'effet de la décroissance sur la contrainte de résistance de flexion $k_{m,\alpha}$	7
3.2.4 Taux de travail.....	8
3.3 Contrainte de flexion dans la zone de faîtage.....	8
3.3.1 Coefficient k_r	9
3.3.2 Contrainte de flexion au faîtage $\sigma_{m,d}$ en N/mm ²	9
3.3.3 Contrainte de résistance de flexion $f_{m,d}$ en N/mm ²	10
3.3.4 Calcul du taux de travail.....	10
3.4 Contrainte de traction perpendiculaire au fil dans la zone de faîtage.....	11
3.4.1 Coefficient traduisant l'influence du volume contraint sur la résistance en traction perpendiculaire au fil k_{vol}	11
3.4.2 Contrainte de traction perpendiculaire au fil dans la zone de faîtage $\sigma_{t,90,d}$ en N/mm ²	11
3.4.3 Contrainte de résistance en traction perpendiculaire $f_{t,90,d}$ en N/mm ²	12
3.4.4 Calcul du taux de travail.....	12
Pour en savoir plus.....	13
TABLEAUX : Vérifications des structures en bois avec les eurocodes	
.....	14
Tab. 1. Valeurs des charges d'exploitation en fonction du bâtiment (source : NF P 06-111-2/A1)	14
Carte de France des valeurs des charges de neige (source : NF EN 1991-1-3/NA)	15
Tab. 2. Coefficients μ_i pour une toiture sans dispositif de retenue de la neige (source : NF EN 1991-1-3).....	16
Tab. 3. Coefficients partiels de l'action permanente pour un bâtiment courant (Source : NF EN 1990/NA).....	16
Tab. 4. Coefficients statistiques en fonction des catégories de bâtiment et de l'altitude (Source : NF EN 1990).....	16
Tab. 5. Valeurs caractéristiques des bois massifs résineux et de peuplier (Source : NF EN 338)...	17
Tab. 6. Valeurs caractéristiques des bois lamellés (source : NF EN 14080).....	17

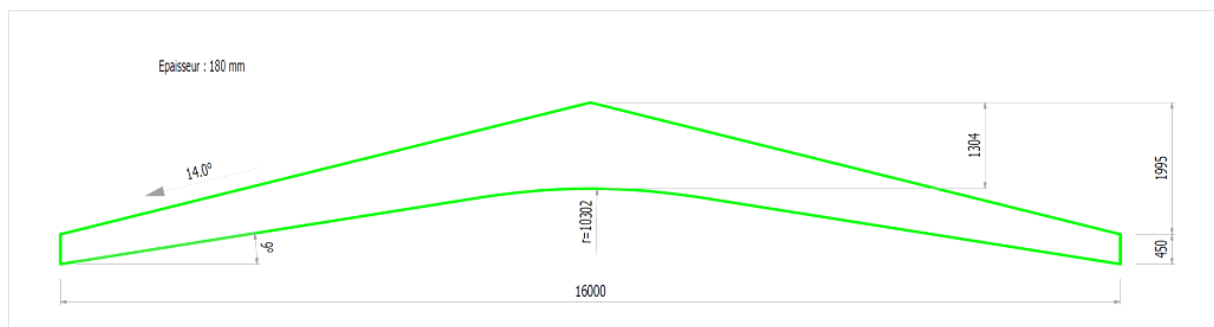
Tab. 7. Valeur coefficient γ_M (Source : NF EN 1995-1-1)	17
Tableau 8 : Valeur de k_{mod} du bois massif, du lamellé-collé, du lamibois (LVL) et du contreplaqué (Source : NF EN 1995-1-1)	18
Tableau 9 : Valeur de k_{mod} des panneaux de lamelles minces, longues et orientées (OSB), (Source : NF EN 1995-1-1)	18
Tab. 10. Valeurs limites réglementaires des flèches (Source : NF EN 1995-1-1)	18
Tab. 11. Facteur de déformation (k_{def}) selon la classe de service et l'humidité H_{bois} (Source : NF EN 1995-1-1)	19

Vérification aux Eurocodes d'une poutre courbe à inertie variable.

Dans une poutre courbe à inertie variable, il y a deux zones à simple décroissance et une zone de faitage avec un intrados courbe. Pour la justifier à l'ELU, il faut définir les charges de structure et climatiques, puis vérifier dans la partie en simple décroissance la contrainte de flexion et dans la zone de faitage les contraintes de flexion, de traction perpendiculaire au fil et de cisaillement.

1 Hypothèses de calcul

Considérons une poutre en bois lamellé-collé classées GL24h réalisée avec des lamelles de 45 mm d'épaisseur, avec un entraxe de 5,5 m et une portée de 16 m. Elle supporte une couverture en bac acier de 7 kg/m², des pannes de 75x200 en C24 avec un entraxe de 2,033 m. La construction est située dans la région A1 à une altitude de 250m. Cette poutre pèse 998 kg. Par simplification un poids moyen uniformément réparti de 1000 kg sera retenu.



2 Détermination des actions

Les actions proviennent du poids de la structure et du poids de la neige.

2.1 Actions provoquées par le poids de la structure.

- Bac acier : 7 kg/m²
- Pannes et poutre : 420 kg /m³ (tableau 5 et 6)

Le calcul consiste à transformer la masse des éléments supportées par la poutre (bac acier et panne) en action exprimées en kN/m² et la masse de la poutre en action exprimées en kN/m. Par simplification, l'accélération terrestre « g » est prise égale à 10 m/s².

- Bac acier : $kg/m^2 \times \frac{g}{1000} = kN/m^2$, soit $7 \times \frac{10}{1000} = 0,07 kN/m^2$
- Pannes : $\frac{kg/m^3 \times g}{1000} \times hauteur (m) \times épaisseur(m) \times \frac{1}{Entraxe\ panne (m)} = kN/m^2$,
Soit $\frac{420 \times 10}{1000} \times 0,200 \times 0,075 \times \frac{1}{2,033} = 0,0310 kN/m^2$
- Poutre, par simplification : $\frac{Poids\ moyen (kg)}{Longueur (m)} \times \frac{g}{1000} = kN/m$, soit $\frac{1000}{16} \times \frac{10}{1000} = 0,625 kN/m$

Les charges de structure surfaciques sont multipliées par la bande de chargement qui est égale à l'entraxe des poutres, soit 5,5 m et le poids de la poutre est ajouté.

Charges totales :

$$G = (0,07 + 0,0310) \times 5,5 + 0,625 = 1,18 \text{ kN/m}$$

2.2 Les charges de neige

Une toiture a une charge de neige S définie par la formule : $S = S_k \times \mu_i(\alpha) \times c_e \times c_t$

Avec :

S_k : valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol (voir la carte de France) ;

μ_i : coefficient de forme de la toiture appliqué à la charge de neige (tableau 2) ;

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 ;

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.

Remarque : Dans la région A1, il n'y a pas de neige exceptionnelle.

Soit pour notre exemple : $S = 0,45 \times 0,8 \times 1 \times 1 = 0,36 \text{ kN/m}^2$ horizontal

Avec :

$S_k = 0,45 \text{ kN/m}^2$ (voir la carte de France) ;

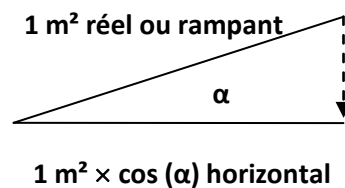
$\mu_i = 0,8$ l'angle du versant étant inférieur à 30° (tableau 2) ;

$c_e = 1$, coefficient d'exposition au vent ;

$c_t = 1$, coefficient thermique.

Les charges de structures étant en m^2 réel ou rampant, il faut transformer les charges de neige en m^2 rampant. 1 m^2 « rampant » a une projection de $1 \times \cos(\alpha)$ horizontal. La charge de neige est donc moins importante pour « 1 m^2 rampant » que pour « 1 m^2 horizontal ».

Fig. 3. Relation entre les surfaces de rampant et horizontale.



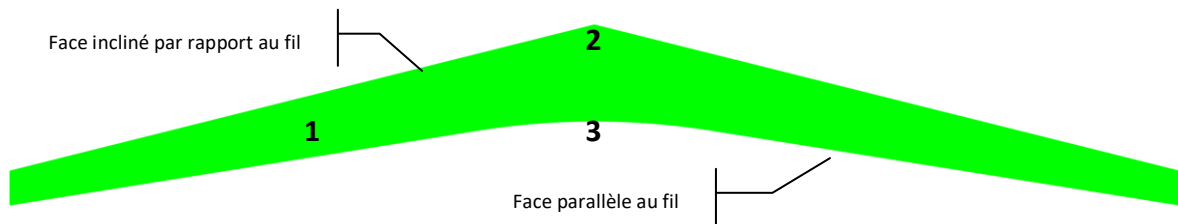
$$S = 0,36 \times \cos 14^\circ = 0,349 \text{ kN/m}^2 \text{ rampant}$$

Comme pour les charges de structure, la charge surfacique est multipliée par la bande de chargement pour obtenir une charge linéique : $S = 0,349 \times 5,5 = 1,92 \text{ kN/m}$

Remarque : Pour notre exemple, les actions du vent ne sont pas prises en compte.

3 Vérification à l'Etat Limite Ultime (ELU).

Il est nécessaire de vérifier la contrainte de flexion dans chaque partie en simple décroissance (1) ainsi que les contraintes de flexion, de cisaillement (2) et de traction perpendiculaire (3) dans la zone de faîtage.



3.1 Combinaison d'action retenue.

Pour notre exemple la combinaison retenue est : $q = 1,35 G + 1,5 S$,

$$\text{Soit } q = 1,35 \times 1,18 + 1,5 \times 1,92 = 4,475 \text{ kN/m}$$

Avec :

- $q = 4,475 \text{ kN/m}$, actions de calcul ;
- $G = 1,18 \text{ kN/m}$, action permanente ;
- $S = 1,92 \text{ kN/m}$, charge de neige.

3.2 Contrainte de flexion dans chaque zone à simple décroissance

La contrainte de flexion dans la zone de décroissance est vérifiée lorsque le taux de travail est inférieur à 1.

$$\text{Taux de travail} = \frac{\sigma_{m,\alpha,d}}{k_{m,\alpha} f_{m,d}} \leq 1$$

Avec :

$\sigma_{m,\alpha,d}$: Contrainte induite située au niveau de la face inclinée d'un angle α , angle de décroissance en N/mm^2 ,

$f_{m,d}$: Contrainte de résistance de flexion en N/mm^2 ,

$k_{m,\alpha}$: Coefficient d'effet de la décroissance sur la contrainte de résistance de flexion.

3.2.1 Contrainte de flexion induite par la combinaison d'action $\sigma_{m,\alpha,d}$ en N/mm^2 .

$$\sigma_{m,0,d} = \sigma_{m,\alpha,d} = \frac{6 \cdot M_d(x)}{b \cdot h(x)^2}$$

Avec :

$\sigma_{m,0,d}$: Contrainte induite située au niveau de la face parallèle aux fibres en N/mm^2 ,

$\sigma_{m,\alpha,d}$: Contrainte induite située au niveau de la face inclinée d'un angle α , angle de décroissance en N/mm^2 .

$M_d(x)$: Moment de flexion déterminé au point (x) où la contrainte est maximum pour un chargement uniformément réparti et symétrique en N.mm .

$h(x)$: hauteur de la poutre au point (x) où la contrainte est maximum en mm

b : épaisseur de la poutre en mm

Calcul du point x point où la contrainte est maximum

La valeur de ce point est définie par la formule : $x = 0,5 \cdot L \cdot \frac{h_s}{h_{ap \text{ décroissance}}}$,

Avec :

L : longueur de la poutre en mm,

h_s : hauteur au fin bout en mm,

$h_{ap \text{ décroissance}}$: hauteur au faîtage de la zone à simple croissance en mm.

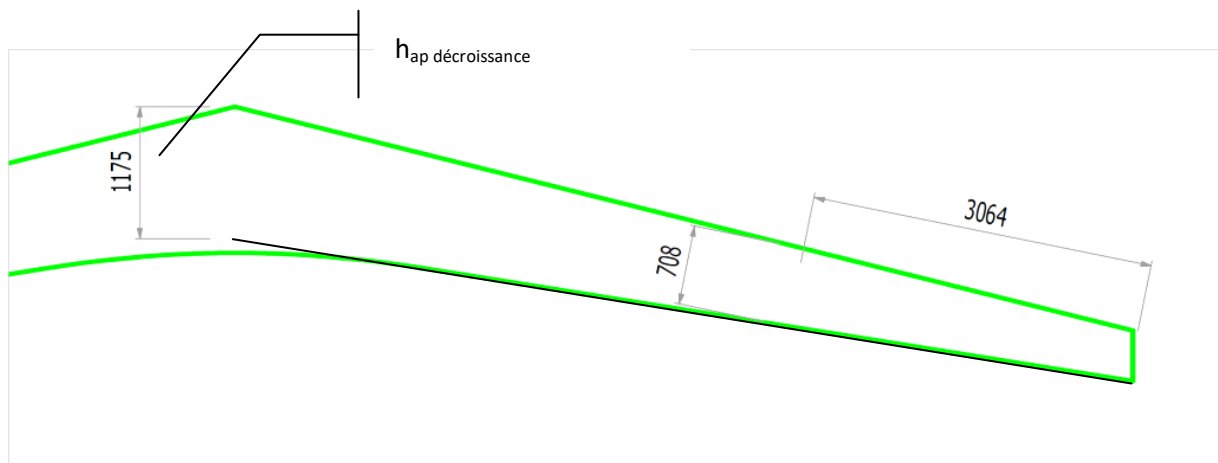
Soit pour notre exemple $x = 0,5 \times 16000 \frac{450}{1175} = 3064 \text{ mm}$

Avec :

L = 16000 mm, longueur de la poutre,

$h_s = 450 \text{ mm}$, hauteur au fin bout,

$h_{ap \text{ décroissance}} = 1175 \text{ mm}$, hauteur au faîtage de la zone à simple croissance.



Calcul du moment de flexion au point x = 3064

Le moment au point 3064 mm de l'extrémité de la poutre est calculé par l'équation :

$$M_d(x) = \frac{q \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q \cdot x^2}{2}$$

$$M_d(3064) = \frac{4,475 \times 16000 \times 3064}{2} - \frac{4,475 \times 3064^2}{2} = 88,69 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

La contrainte de flexion devient :

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \frac{6 \times 88,69 \cdot 10^6}{180 \times 708^2} = 5,9 \text{ N/mm}^2$$

Remarque : la hauteur de la poutre au point où la contrainte est maximum (708 mm) est définie par construction.

3.2.2 Contrainte de résistance de flexion $f_{m,d}$ en N/mm^2 .

La contrainte de résistance en flexion est donnée par la formule :

$$f_{m,d} = f_{m,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_{sys} \cdot k_h$$

Avec :

$f_{m,k}$: Contrainte caractéristique de résistance en flexion en N/mm^2 , soit $24 N/mm^2$ (tableau 6)

k_{mod} : Coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée et de la classe de service, soit 0,9 (tableau 8)

γ_M : Coefficient partiel qui tient compte des incertitudes sur le matériau. Ce coefficient vaut 1,25 pour le bois lamellé-collé (tableau 7).

k_{sys} : L'effet système apparaît lorsque plusieurs éléments porteurs de même nature et de même fonction (solives, charpente industrielle), avec un entraxe inférieur à 1,2 m, sont sollicités par un même type de chargement réparti uniformément. La résistance de l'ensemble est alors supérieure à la résistance d'un seul élément pris isolément. Pour notre exemple, il n'est généralement pas appliqué car l'entraxe entre les poutres est fréquemment supérieur à 1,2 m.

k_h : Le coefficient k_h majore les résistances pour les hauteurs inférieures à 600 mm pour le bois lamellé-collé.

si $h \geq 600$ mm $k_h = 1$

si $h \leq 600$ mm $k_h = \min(1,1 ; (600/h)^{0.1})$

Avec h la hauteur de la pièce en mm

Pour notre exemple, $h = 708$ mm, soit $k_h = 1$

$$\text{Soit : } f_{m,d} = 24 \cdot \frac{0,9}{1,25} \cdot 1 \cdot 1 = 17,3 \text{ N/mm}^2$$

3.2.3 Coefficient d'effet de la décroissance sur la contrainte de résistance de flexion $k_{m,\alpha}$

Lorsque la face inclinée est comprimée (généralement située dessus) et que la contrainte maximum est située dans une zone où l'inertie est variable, $k_{m,\alpha}$ est égale :

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1,5 \cdot f_{v,d}} \cdot \tan(\alpha) \right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \tan^2(\alpha) \right)^2}}$$

Avec :

α : Angle de la pente de la décroissance en degré, $14^\circ - 9^\circ = 5^\circ$

$f_{m,0,d}$: Contrainte de résistance de flexion parallèle au fil, soit $17,3 N/mm^2$ (voir « Contrainte de résistance de flexion $f_{m,d}$ en N/mm^2 »).

$f_{v,d}$: Contrainte de résistance de cisaillement donné par la formule $f_{v,d} = f_{v,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$,

Avec :

$f_{v,k}$: Contrainte caractéristique de cisaillement en flexion en N/mm² (tableau 6),

k_{mod} : Coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée et de la classe de service (tableau 8),

γ_M : Coefficient partiel qui tient compte des incertitudes sur le matériau, soit 1,25 pour le bois lamellé-collé (tableau 7).

$$\text{Soit : } f_{v,d} = 3,5 \cdot \frac{0,9}{1,25} = 2,52 \text{ N / mm}^2,$$

$f_{c,90,d}$: Contrainte de résistance de compression perpendiculaire donné par la formule

$$f_{c,90,d} = f_{c,90,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

Avec :

$f_{c,90,k}$: Contrainte caractéristique de compression perpendiculaire en N/mm² (tableau 6)

k_{mod} : Coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée et de la classe de service (tableau 8)

γ_M : Coefficient partiel qui tient compte des incertitudes sur le matériau, soit 1,25 pour le bois lamellé-collé (tableau 7).

$$\text{Soit : } f_{c,90,d} = 2,5 \cdot \frac{0,9}{1,25} = 1,8 \text{ N / mm}^2,$$

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{17,3}{1,5 \times 2,52} \tan(5^\circ)\right)^2 + \left(\frac{17,3}{1,8} \tan^2(5^\circ)\right)^2}} = 0,926$$

3.2.4 Taux de travail

Le taux de travail devient : $\frac{\sigma_{m,\alpha,d}}{k_{m,\alpha} \times f_{m,d}} = \frac{5,9}{0,926 \times 17,3} = 0,37 < 1$, le critère est vérifié.

3.3 Contrainte de flexion dans la zone de faitage

La zone de faitage s'étend du point de raccordement entre la partie courbe et la partie droite. Par ailleurs la courbure des lamelles provoque une diminution de la résistance en flexion. Le taux de

travail est donné par la formule : Taux de travail = $\frac{\sigma_{m,d}}{k_r f_{m,d}} \leq 1$

Avec :

$\sigma_{m,d}$: Contrainte induite au faitage en N/mm²,

$f_{m,d}$: Contrainte de résistance de flexion en N/mm²,

k_r : coefficient qui diminue la résistance de flexion des lamelles lorsqu'elles sont cintrées,



3.3.1 Coefficient k_r

La valeur du coefficient k_r est fonction du rapport du rayon de cintrage sur l'épaisseur des lamelles.

$$k_r = \begin{cases} 1, & \text{pour } \frac{r_{int}}{t} \geq 240 \\ 0,76 + 0,001 \frac{r_{int}}{t}, & \text{pour } \frac{r_{int}}{t} < 240 \end{cases}$$

Avec :

r_{int} : Rayon intérieur

t : Epaisseur des lamelles

Soit pour notre exemple :

$$\frac{r_{int}}{t} = \frac{10302}{45} = 229 < 240; \text{ d'où } k_r = 0,76 + 0,001 \frac{10302}{45} = 0,99$$

3.3.2 Contrainte de flexion au faîtage $\sigma_{m,d}$ en N/mm².

La contrainte de flexion est définie par la formule : $\sigma_{m,d} = k_L \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2}$

Avec :

$M_{ap,d}$: Moment de flexion déterminé au faîtage en N.mm.

h_{ap} et b : hauteur au faîtage et épaisseur de la poutre en mm

k_L : Coefficient fonction de la forme de la poutre

Calcul du coefficient k_L

La brusque variation de la section au faîtage majore la contrainte. Ce phénomène est traduit par le coefficient k_L . Il prend en compte la hauteur au faîtage, la pente de la décroissance et le rayon de courbure de la poutre. Il est déterminé par la formule :

$$k_L = k_1 + k_2 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + k_3 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2 + k_4 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^3$$

Avec :

$$k_1 = 1 + 1,4 \tan \alpha_{ap} + 5,4 \tan^2 \alpha_{ap}$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \tan \alpha_{ap}$$

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \tan \alpha_{ap} - 7,8 \tan^2 \alpha_{ap}$$

$$k_4 = 6 \tan^2 \alpha_{ap}$$

$$r = r_{in} + 0,5 h_{ap}$$

r_{in} : Rayon intérieur en mm

h_{ap} : hauteur au faîtage en mm

α_{ap} : Angle de la pente au faîtage en degré.

Soit pour notre exemple : $k_l = 1,685 - 1,645 \frac{1304}{10954} + 2,185 \left(\frac{1304}{10954} \right)^2 + 0,373 \left(\frac{1304}{10954} \right)^3 = 1,521$

Avec :

$$k_1 = 1 + 1,4 \tan 14^\circ + 5,4 \tan^2 14^\circ = 1,685$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \tan 14^\circ = -1,645$$

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \tan 14^\circ - 7,8 \tan^2 14^\circ = 2,185$$

$$k_4 = 6 \tan^2 14^\circ = 0,373$$

$$r = 10302 + 0,5 \times 1304 = 10954 \text{ mm}$$

$$\alpha_{ap} : 14^\circ.$$

Calcul du moment de flexion $M_{ap,d}$

pour un chargement uniformément réparti, le moment de flexion au faîtage est défini par la formule : $M_{ap,d} = ql^2/8$, soit pour notre exemple $M_{ap,d} = 4,475 \times 16000^2 / 8$; $M_{ap,d} = 143,2 \cdot 10^6 \text{ N.mm}$

Calcul de la contrainte $\sigma_{m,d}$

$$\text{La contrainte de flexion devient : } \sigma_{m,d} = 1,521 \frac{6 \times 143,2 \cdot 10^6}{180 \times 1304^2} = 4,3 \text{ N/mm}^2$$

Avec :

$$M_{ap,d} : 143,2 \cdot 10^6 \text{ N.mm.}$$

$$b \text{ et } h_{ap} : 180 \text{ et } 1304 \text{ mm.}$$

$$k_l : 1,521.$$

3.3.3 Contrainte de résistance de flexion $f_{m,d}$ en N/mm^2 .

La contrainte de résistance en flexion a été définie lors de la vérification de la zone de simple décroissance (paragraphe « Contrainte de résistance de flexion $f_{m,d}$ en N/mm^2 »).

$$f_{m,d} = 24 \cdot \frac{0,9}{1,25} \cdot 1 \cdot 1 = 17,3 \text{ N/mm}^2$$

3.3.4 Calcul du taux de travail

$$\text{Le taux de travail devient : } \frac{4,3}{0,99 \times 17,3} = 0,25 < 1, \text{ le critère est vérifié}$$

Avec :

$$\sigma_{m,d} = 4,3 \text{ N/mm}^2,$$

$$f_{m,d} 17,3 \text{ N/mm}^2,$$

$$k_r = 0,99.$$

3.4 Contrainte de traction perpendiculaire au fil dans la zone de faîtage

La contrainte de traction perpendiculaire au fil est justifiée lorsque le taux de travail vérifie

l'équation :
$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1$$

Avec :

k_{dis} : Coefficient de dispersion des contraintes dans la zone de faîtage valant 1,7 pour les poutres à intrados courbe à inertie variable.

k_{vol} : Coefficient traduisant l'influence du volume contraint sur la résistance en traction perpendiculaire au fil.

$\sigma_{t,90,d}$: Contrainte de traction perpendiculaire au fil dans la zone de faîtage en N/mm².

$f_{t,90,d}$: Contrainte de résistance en traction perpendiculaire en N/mm².

3.4.1 Coefficient traduisant l'influence du volume contraint sur la résistance en traction perpendiculaire au fil k_{vol}

Le coefficient de volume est déterminé par la formule :
$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0,2}$$

Avec :

V_0 Volume de référence = 0,01m³

V Volume dans la zone de faîtage, V étant limité au 2/3 du volume total de la poutre en m³

Par construction sur un logiciel de DAO, le volume de la poutre est de 2,365 m³. La valeur limite est de $V_{limite} = \frac{2}{3} \times 2,365 = 1,577 \text{ m}^3$. Le volume de la zone de faîtage faisant 0,695 m³, cette valeur est retenue.

Soit pour notre exemple, $k_{vol} = \left(\frac{0,01}{0,695} \right)^{0,2} = 0,428$

3.4.2 Contrainte de traction perpendiculaire au fil dans la zone de faîtage $\sigma_{t,90,d}$ en N/mm².

La Contrainte de traction perpendiculaire au fil est définie par la formule :
$$\sigma_{t,90,d} = k_p \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2}$$

Avec :

$M_{ap,d}$: Moment de flexion déterminé au faîtage en N.mm.

h_{ap} et b : hauteur au faîtage et épaisseur de la poutre en mm.

k_p : Coefficient fonction de la forme de la poutre.

Calcul du coefficient k_p

Le coefficient k_p est défini par la formule :
$$k_p = k_5 + k_6 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + k_7 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2$$

Avec :

$$k_5 = 0,2 \tan \alpha_{ap}$$

$$k_6 = 0,25 - 1,25 \tan \alpha_{ap} + 2,6 \tan^2 \alpha_{ap}$$

$$k_7 = 2,1 \tan \alpha_{ap} - 4 \tan^2 \alpha_{ap}$$

$$r = r_{in} + 0,5 h_{ap} ;$$

r_{in} : rayon intérieur en mm

h_{ap} : hauteur au faîtage en mm

α_{ap} : Angle de la pente au faîtage en degré.

$$\text{Soit pour notre exemple : } k_p = 0,05 + 0,038 \frac{1304}{10954} + 0,275 \left(\frac{1304}{10954} \right)^2 = 0,058$$

Avec :

$$k_5 = 0,2 \tan 14^\circ = 0,05$$

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \tan 14^\circ + 2,6 \tan^2 14^\circ = 0,038$$

$$k_7 = 2,1 \tan 14^\circ - 4 \tan^2 14^\circ = 0,275$$

$$r = 10302 + 0,5 \times 1304 = 10954 \text{ mm}$$

$$\alpha_{ap}: 14^\circ .$$

Calcul de la contrainte $\sigma_{t,90,d}$

$$\text{La contrainte de flexion devient : } \sigma_{t,90,d} = 0,058 \frac{6 \times 143,2 \cdot 10^6}{180 \times 1304^2} = 0,16 \text{ N/mm}^2$$

Avec :

$$M_{ap,d} : 143,2 \cdot 10^6 \text{ N.mm.}$$

b et h_{ap} : 180 et 1304 mm.

$$k_p : 0,058.$$

3.4.3 Contrainte de résistance en traction perpendiculaire $f_{t,90,d}$ en N/mm²

La contrainte de résistance en traction perpendiculaire est définie par la formule :

$$f_{t,90,d} = f_{t,90,k} \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

Avec :

$f_{t,90,k}$: Contrainte caractéristique en traction perpendiculaire en N/mm² (tableau 6),

k_{mod} : Coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée et de la classe de service (tableau 8),

γ_M : Coefficient partiel qui tient compte des incertitudes sur le matériau. Ce coefficient vaut 1,25 pour le bois lamellé-collé (tableau 7).

$$\text{Soit pour notre exemple : } f_{t,90,d} = 0,5 \frac{0,9}{1,25} = 0,36 \text{ N/mm}^2$$

3.4.4 Calcul du taux de travail

$$\text{Le taux de travail devient : } \frac{0,16}{1,7 \times 0,428 \times 0,36} = 0,61 < 1, \text{ le critère est vérifié.}$$

Avec :

$$\sigma_{t,90,d} = 0,16 \text{ N/mm}^2.$$

$$k_{dis} = 1,7.$$

$$k_{vol} = 0,428.$$

$$f_{t,90,d} = 0,36 \text{ N/mm}^2.$$

Remarques :

La contrainte de traction perpendiculaire est généralement le critère dimensionnant pour les poutres courbes à inertie variable.

Lorsque le cisaillement n'est pas nul au milieu de la poutre (cas des chargements asymétriques par exemple), il faut faire la somme des taux de travail du cisaillement et de la traction perpendiculaire.

$$\text{Taux de travail} = \frac{\tau_d}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1$$

Avec

τ_d : Contrainte de cisaillement induite en N/mm².

$f_{v,d}$: Contrainte de résistance de cisaillement en N/mm².

Pour en savoir plus

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

TABLEAUX : Vérifications des structures en bois avec les eurocodes

Tab. 1. Valeurs des charges d'exploitation en fonction du bâtiment (source : NF P 06-111-2/A1)

Catégorie	Charge uniformément répartie q_k (kN/m ²)	Charge concentrée 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, etc.)	2,5	3
– C2 Locaux avec sièges fixes (théâtre, cinéma, etc.)	4	4
– C3 Locaux sans obstacles à la circulation (musée, salles d'exposition)	4	4
– C4 Locaux pour activités physiques (dancing, salles de gymnastique, etc.)	5	7
– C5 Locaux susceptibles d'être surpeuplés (salles de concert, terrasses, etc.)	5	4,5
D – Commerces		
– D1 Commerces de détail 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 ≤ 15 % + étanchéité	0,8 (1)	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	–

(1) q_k sur une surface rectangulaire ($A \times B$) de 10 m² telle que $A/B \leq 2$.

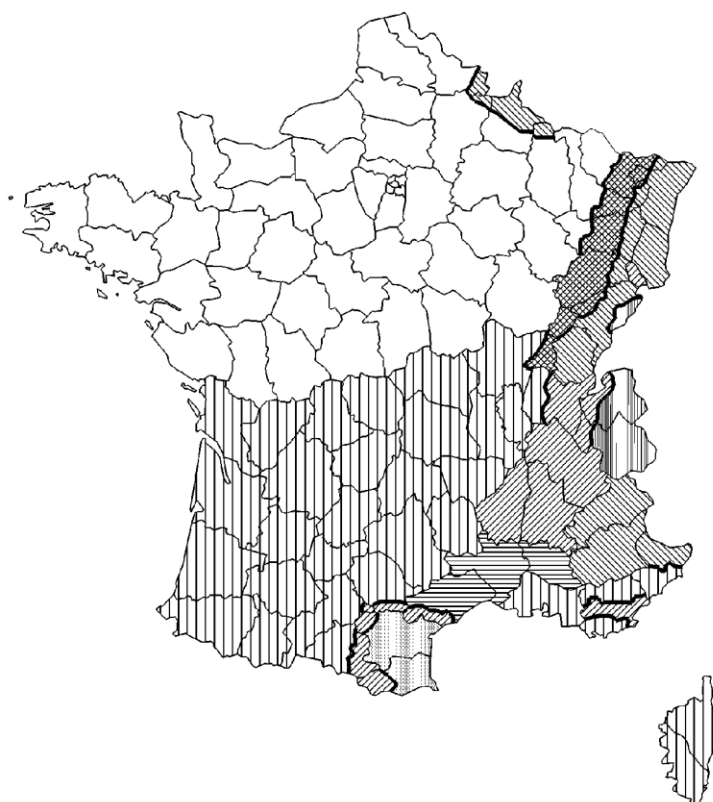
Les vérifications sont effectuées avec la charge uniformément répartie q_k puis avec la charge concentrée Q_k .

Pour les locaux de 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 $A_0 = 3,5$ m² lorsque l'élément étudié reprend une surface supérieure à 15,2 m².

Les charges des équipements importants sont précisés 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 sont prises en compte lors de la vérification de la déformation à l'état limite de service.

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



Régions :

Valeurs caractéristiques (S_k) de la charge de neige sur un sol à une altitude inférieure à 200 m.
Valeurs de la charge de neige exceptionnelle (S_{Ad}) sur un sol
Augmentation de la charge lorsque l'altitude est supérieure à 200 m.

A1	A2	B1	B2	C1	C2	D	E	
0,45	0,45	0,55	0,55	0,65	0,65	0,90	1,40	
—	1,00	1,00	1,35	—	1,35	1,80	—	
Δs_1							Δs_2	

(charges en KN/m^2)

Altitude A	Δs_1	Δs_2
de 200 à 500 m	$A/1000 - 0,20$	$1,5 A/1000 - 0,30$
de 500 à 1000 m	$1,5 A/1000 - 0,45$	$3,5 A/1000 - 1,30$
de 1000 à 2000 m	$3,5 A/1000 - 2,45$	$7 A/1000 - 4,80$

Remarques

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

Tab. 2. Coefficients μ_i pour une toiture sans dispositif de retenue de la neige (source : NF EN 1991-1-3)

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 1991-1-3

Tab. 3. Coefficients partiels de l'action permanente pour un bâtiment courant (Source : NF EN 1990/NA)

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

Tab. 4. Coefficients statistiques en fonction des catégories de bâtiment et de l'altitude (Source : NF EN 1990)

	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 \leq 1 000 m	0,5	0,3	0
Action du vent			
	0,6	0,2	0

Tab. 5. 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 compression axiale		16	17	18	20	21	22	23	25	26
$f_{c,90,k}$	Contrainte de compression 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		3	3,2	3,4	3,8	4	4	4	4	4
$E_{0,mean}$	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. 6. Valeurs caractéristiques des bois lamellés (source : NF EN 14080)

		Classe de résistance du bois lamellé-collé						
Propriété	Symbole	GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
Résistance à la flexion	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Résistance à la traction	$f_{t,0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,4	24	25,6
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Résistance à la compression	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Résistance au cisaillement (cisaillement et torsion)	$f_{v,g,k}$	3,5						
Résistance au cisaillement roulant	$f_{r,g,k}$	1,2						
Module d'élasticité	$E_{0,g,moyen}$	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						
Module de cisaillement	$G_{g,moyen}$	650						
	$G_{g,05}$	540						
Module de cisaillement roulant	$G_{r,g,moyen}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Masse volumique	$\rho_{g,k}$	340	370	385	405	425	430	440
	$\rho_{g,moyen}$	370	410	420	445	460	480	490

Tab. 7. Valeur coefficient γ_M (Source : NF EN 1995-1-1)

Éléments considérés		γ_M
Matériaux	Bois	1,3
	Lamellé-collé	1,25
	Lamibois (LVL), OSB	1,2
	Panneaux de particules et de fibres	1,3
Assemblages		1,3
Combinaisons accidentelles		1

Tableau 8 : Valeur de k_{mod} du bois massif, du lamellé-collé, du lamibois (LVL) et du contreplaqué (Source : NF EN 1995-1-1)

Durée de chargement		Classe de service		
Classe de durée	Exemple	1 Hbois < 13% (local chauffé)	2 13%<Hbois < 20% (sous abris)	3 Hbois > 20 % (extérieur)
permanente (>10 ans)	Charge de structure	0,6	0,6	0,5
long terme (6mois à 10 ans)	Stockage	0,7	0,7	0,55
moyen terme (1 semaine à 6mois)	Charges d'exploitation Neige Altitude >1000m	0,8	0,8	0,65
court terme (<1semaine)	Neige Altitude ≤1000m	0,9	0,9	0,7
Instantanée	Vent Situation accidentelle Neige exceptionnelle	1,1	1,1	0,9

Tableau 9 : Valeur de k_{mod} des panneaux de lamelles minces, longues et orientées (OSB), (Source : NF EN 1995-1-1)

Durée de chargement		Classe de service		
		1 Hbois < 13% (local chauffé)	2 13%<Hbois < 20% (sous abris)	
Classe de durée	Exemple de chargement	OSB/2	OSB/3, OSB/4	OSB/3, OSB/4
permanente (>10 ans)	Charge de structure	0,3	0,4	0,3
long terme (6mois à 10 ans)	Stockage	0,45	0,5	0,4
moyen terme (1 semaine à 6mois)	Charges d'exploitation Neige > 1000 m	0,65	0,7	0,55
court terme (<1semaine)	Neige ≤ 1000 m	0,85	0,9	0,7
Instantanée	Vent Situation accidentelle Neige exceptionnelle	1,1	1,1	0,9

Tab. 10. Valeurs limites réglementaires des flèches (Source : NF EN 1995-1-1)

	Bâtiments courants			Bâtiments agricoles et similaires		
	$W_{inst(Q)}$	$W_{net,fin}$	W_{fin}	$W_{inst(Q)}$	$W_{net,fin}$	W_{fin}
Chevrans	-	L/150	L/125	-	L/150	L/100
Éléments structuraux	L/300	L/200	L/125	L/200	L/150	L/100

Remarques

- La valeur limite des consoles et porte-à-faux est doublée. Elle est toujours supérieure à 5 mm.
- Les panneaux de planchers et supports de toiture ont une valeur limite de flèche nette finale ($W_{net,fin}$) de L/250.
- La valeur limite de flèche horizontale est de L/200 pour les éléments individuels soumis au vent. Pour les autres applications, elles sont identiques aux valeurs limites verticales des éléments structuraux.

Tab. 11. Facteur de déformation (k_{def}) selon la classe de service et l'humidité H_{bois} (Source : NF EN 1995-1-1)

Matériau			Classe de service		
			1 $H_{\text{bois}} < 13 \%$ (local chauffé)	2 $13 \% < H_{\text{bois}} < 20 \%$ (sous abri)	3 $H_{\text{bois}} > 20 \%$ (extérieur)
Essence	Type	Classe de service (1)			
Bois massif	—	—	0,60	0,80	2,00
Lamellé-collé	—	—	0,60	0,80	2,00
Lamibois (LVL)	—	—	0,60	0,80	2,00
Contreplaqué	1	1	0,80	Sans objet	Sans objet
	2	2	0,80	1,00	Sans objet
	3	3	0,80	1,00	2,50
OSB	OSB/2	1	2,25	Sans objet	Sans objet
	OSB/3/4	2	1,50	2,25	Sans objet
Panneau de particules	P4	1	2,25	Sans objet	Sans objet
	P5	2	2,25	3,00	Sans objet
	P6	1 (2)	1,50	Sans objet	Sans objet
	P7	2 (2)	1,50	2,25	Sans objet
Panneau de fibre dur	HB.LA	1	2,25	Sans objet	Sans objet
	HB.HLA	2	2,25	3	Sans objet
Panneau de fibre semi-dur	MHB.LA	1	2,25	Sans objet	Sans objet
	MHB.HLS	2	1,50	2,25	Sans objet
Panneau de fibre MDF	MDF.LA	1	2,25	Sans objet	Sans objet
	MDF.HLS	2	1,50	2,25	Sans objet

(1) On distingue 3 classes de service, numérotées 1, 2 et 3 :

Classe de service	Utilisation du bois	Humidité d'équilibre du bois
1	Dans un local chauffé	< 13 % pendant la majorité de l'année, valeur qui peut être dépassée pendant quelques semaines par an
2	Dans un local non chauffé	Comprise entre 13 et 20 % pendant la majorité de l'année, valeur peut être dépassée pendant quelques semaines par an
3	À l'extérieur	> 20 % pendant la majorité de l'année

(2) Sous contrainte élevée.