

Sommaire

Vérification aux eurocodes d'un poteau dans une paroi d'un bâtiment.....	2
1 Hypothèses de calcul.....	2
2 Détermination des actions	3
2.1 Actions provoquées par le poids de la structure.	3
Etape 1 : Détermination de la surface de toiture reprise par le poteau et de la largeur de la bande de chargement (fig1).	3
Etape 2 : Transformation de la masse en charge	3
Etape 3 : Détermination de la charge de structure (G) repris par le poteau.....	3
2.2 Les charges de neige.....	3
Etape 1 : Calcul de la neige au sol.....	3
Etape 2 : Calcul coefficient de forme μ_i	3
Etape 3 : Calcul de la charge de neige sur la toiture terrasse en kN/m ² horizontal.....	4
2.3 Les effets du vent.	4
3 Les combinaisons d'actions.	4
Les combinaisons à l'Etat Limite Ultime (ELU).....	4
4 Vérification à l'Etat Limite Ultime (ELU).	5
4.1 Calcul de la charge reprise par le poteau et section de calcul	5
4.2 Contrainte provoquée par les actions $\sigma_{m,y,d}$	6
4.3 Contrainte de résistance du bois $f_{m,d}$	6
4.4 Coefficient d'instabilité provenant du déversement k_{crit}	7
4.4.1 Calcul de la contrainte critique $\sigma_{m,crit}$	7
4.4.2 Calcul de l'élancement relatif de flexion $\lambda_{rel,m}$	7
4.4.3 Calcul du coefficient k_{crit}	7
4.5 Contrainte provoquée par les actions, $\sigma_{c,0,d}$	8
4.6 Contrainte de résistance du bois $f_{c,0,d}$	8
4.7 Coefficient de flambement k_c ,	9
4.8 Taux de travail des sollicitations composées (compression et flexion)	11
5 Vérification à l'Etat Limite de Service (ELS).....	11
6 Comparaison entre les critères de dimensionnement.....	12
En savoir plus.....	12
TABLEAUX : Vérifications des structures en bois avec les eurocodes	13
Tab. 1. Valeurs des charges d'exploitation en fonction du bâtiment (source : NF P 06-111-2/A1)	13
Carte de France des valeurs des charges de neige (source : NF EN 1991-1-3/NA).....	14
Tab. 2. Coefficients μ_i pour une toiture sans dispositif de retenue de la neige (source : NF EN 1991-1-3)	15
Tab. 3. Coefficients partiels de l'action permanente pour un bâtiment courant (Source : NF EN 1990/NA).....	15
Tab. 4. Coefficients statistiques en fonction des catégories de bâtiment et de l'altitude (Source : NF EN 1990)	15
Tab. 5. Valeurs caractéristiques des bois massifs résineux et de peuplier (Source : NF EN 338).....	16
Tab. 6. Valeurs caractéristiques des bois lamellés (source : NF EN 14080)	16
Tab. 7. Valeur coefficient γ_M (Source : NF EN 1995-1-1).....	16
Tableau 8 : Valeur de k_{mod} du bois massif, du lamellé-collé, du lamibois (LVL) et du contreplaqué (Source : NF EN 1995-1-1).....	17
Tab. 9. Valeurs limites réglementaires des flèches (Source : NF EN 1995-1-1).....	17
Tab. 10. Facteur de déformation (k_{def}) selon la classe de service et l'humidité H_{bois} (Source : NF EN 1995-1-1).....	18

Vérification aux eurocodes d'un poteau dans une paroi d'un bâtiment.

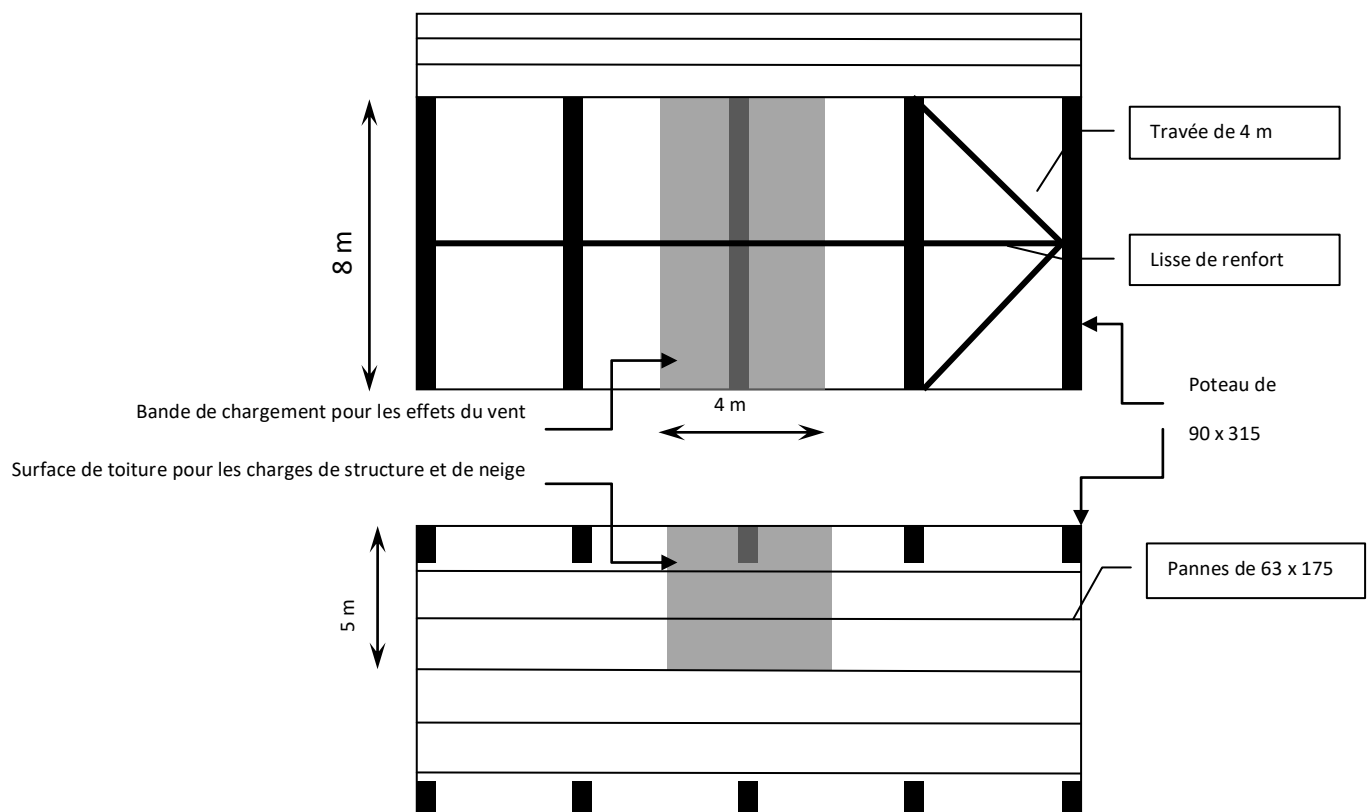
Un poteau d'une paroi reçoit les efforts de la toiture et les efforts de vent. Les efforts provenant de la gravité provoquent de la compression avec un risque de flambement et les efforts de vent provoquent de la flexion.

La justification exige des vérifications à l'état limite ultime et à l'état limite de service. La première étape consiste à définir les actions, les charges de structure et les effets du vent. Puis 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 les contraintes de compression axiale en excluant le risque de flambage, les contraintes de flexion et de cisaillement. Pour vérifier l'état limite de service, il faut calculer la déformation instantanée sous charges variables uniquement, car seul le vent provoque de la flexion.

1 Hypothèses de calcul

Considérons un bâtiment non chauffé à une altitude de 180 m (zone A1), situé en ville avec une toiture inclinée à 14° , 4 travées de 4 m en longueur et d'une largeur de 10 m. Les poteaux reprennent une surface horizontale de toiture de 20 m^2 et une largeur de bande de chargement de 4 m (fig 1). Le poteau est en bois lamellé-collé classé GL24h et sa section est de $90 \times 315 \text{ mm}$. Le poteau reçoit un renfort au milieu de la hauteur pour le maintenir dans son épaisseur. La toiture est en bac acier de 17 kg/m^2 supporté par de pannes de 63×175 en bois massif classé C24 avec un entraxe projeté (horizontal) de 1,67 m. Le vent exerce une pression sur le long pan de $0,42 \text{ kN/m}^2$.

Fig 1 : Vue en plan et vue du long pan sans le bardage



2 Détermination des actions

Les charges de structure et de neige provoquent un effort parallèle à l'axe du poteau. Il sera sollicité en compression. Le vent provoque un effort perpendiculaire à l'axe du poteau. Il sera sollicité en flexion.

2.1 Actions provoquées par le poids de la structure.

Etape 1 : Détermination de la surface de toiture reprise par le poteau et de la largeur de la bande de chargement (fig1).

Les travées ont une longueur de 4 m. Le poteau reprend 1/2 entraxe à gauche et 1/2 entraxe à droite, soit un entraxe complet ($4000/2 + 4000/2 = 4000$ mm). Pour la toiture, chaque poteau reprend la moitié de la largeur du bâtiment, soit $10/2 = 5$ m.

La largeur de la bande de chargement est de 4 m.

La surface de toiture vue en plan (horizontale) est de $4 \times 5 = 20$ m².

Etape 2 : Transformation de la masse en charge

Le calcul consiste à transformer la masse du bac acier et des pannes (tableau 5) en action exprimées en kN/m² horizontal. Par simplification, l'accélération terrestre « g » est prise égale à 10 m/s².

$$\text{Bac acier : } \frac{\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{g}}{1000}}{\cos(\alpha)} = \text{kN/m}^2 \text{ horizontal, soit } \frac{17 \cdot \frac{10}{1000}}{\cos(14^\circ)} = 0,175 \text{ kN/m}^2 \text{ horizontal}$$

$$\text{Panne : } \frac{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \text{g} \cdot \text{hauteur (m)} \cdot \text{épaisseur (m)}}{\text{entraxe projeté pannes}} = \text{kN/m}^2 \text{ horizontal,}$$

$$\text{soit } \frac{\frac{420 \cdot 10}{1000} \cdot 0,17 \cdot 0,063}{1,67} = 0,028 \text{ kN/m}^2 \text{ horizontal}$$

Etape 3 : Détermination de la charge de structure (G) repris par le poteau

La charge totale de structure surfacique est multipliée par la surface de toiture pour obtenir une charge ponctuelle. Le poids du poteau est négligé.

Charges totales :

$$G = (0,175 + 0,028) \cdot 20 = 4,06 \text{ kN}$$

2.2 Les charges de neige

Le Bâtiment à une toiture inclinée à moins de 30°. Le bâtiment est situé en zone A1 à une altitude de 180m (carte de France et tableau 2). Les coefficients d'exposition C_e et thermique C_t sont égaux à 1.

Etape 1 : Calcul de la neige au sol

$$S_{k,180} = S_{k,200}$$
$$S_{k,180} = 0,45 \text{ kN/m}^2 \text{ sol}$$

Etape 2 : Calcul coefficient de forme μ_i

Pour un l'angle inférieur à 30° : $\mu_{1(14^\circ)} = 0,8$

Etape 3 : Calcul de la charge de neige sur la toiture terrasse en kN/m² horizontal

La formule de calcul de neige sur une toiture est : $s = s_k \cdot \mu_{i(\alpha)} \cdot c_e \cdot c_t$

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

La surface de chargement du poteau est de 20 m², $S = 0,36 \cdot 20 = 7,2 \text{ kN}$

Remarque : Il n'y a pas de neige exceptionnelle dans la zone A1.

2.3 Les effets du vent.

Une étude avec un logiciel apporte les résultats suivants : Valeur moyenne de pression extérieure : 0,42 kN/m², Soit avec une bande de chargement de 4 m, $W = 0,42 \cdot 4 = 1,68 \text{ kN/m}$

Le tableau A précise la valeur et la direction de l'effort en fonction du cas de charge.

Tableau A : effort repris par le poteau en fonction du cas de charge

Cas de charge	Effort sur le poteau	Direction de l'effort
G	4,06 kN	Parallèle à l'axe du poteau
S	7,2 kN	Parallèle à l'axe du poteau
W	1,68 kN/m	perpendiculaire à l'axe du poteau

3 Les combinaisons d'actions.

Une première vérification consiste à confirmer que pendant toute la durée d'exploitation du bâtiment la sécurité des personnes sera assurée. C'est la vérification à l'Etat Limite Ultime ou ELU. Une deuxième vérification permet de contrôler la déformation des poteaux. C'est la vérification à l'Etat Limite de service ou ELS.

Les combinaisons à l'Etat Limite Ultime (ELU)

Les combinaisons à l'ELU concernent la résistance de la structure (tableaux 3 et 4). Le risque de neige exceptionnelle n'existe pas dans la zone A1.

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

$$q_1 = 1,35G$$

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

$$q_4 = 1,35 G + 1,5 S + 0,6 \cdot 1,5 W_+$$

$$q_5 = 1,35 G + 1,5 W_+ + 0,5 \cdot 1,5 S$$

Remarque :

- La combinaison avec la structure et le vent ($1,35G + 1,5 W_+$) n'est pas nécessaire, car la sollicitation est moins importante que les combinaisons q_4 et q_5 et la résistance du bois est identique.

- Les sollicitations simples ne seront pas vérifiées pour cet exemple avec les combinaisons $1,35G$ et $1,35G + 1,5S$

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

La vérification à l'ELU consiste à vérifier le poteau avec l'effort normal (compression axiale avec risque de flambement) et l'effort tranchant (flexion avec risque de déversement). Le poteau est assemblé par ferrure boulonné en pied et moisé boulonné en tête. Le cisaillement au niveau de l'assemblage doit être justifié lors de la vérification de l'assemblage (traité dans un prochain document).

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

Le tableau B précise l'effort normal et tranchant repris par le poteau en fonction de la combinaison d'action

Tableau B : efforts normal et tranchant repris par le poteau en fonction de la combinaison d'action

Combinaison à l'ELU	Effort normal en kN (G et S)	Effort tranchant en kN/m (W)	Sollicitations
$q_4 = 1,35 G + 1,5 S + 0,6 * 1,5 W_+$	$1,35 * 4,06 + 1,5 * 7,2 = 16,281$	$0,6 * 1,5 * 1,68 = 1,512$	Flexion + Compression
$q_5 = 1,35 G + 1,5 W_+ + 0,5 * 1,5 S$	$1,35 * 4,06 + 0,5 * 1,5 * 7,2 = 10,881$	$1,5 * 1,68 = 2,52$	Flexion + Compression

Le bois lamellé-collé est séché avant le collage des lames, puis il est raboté. L'humidité du bois est voisine de 12%, il n'est donc pas nécessaire de diminuer la section.

La sollicitation composée (flexion et compression) est provoquée par les combinaisons q_4 et q_5 . Les contraintes de flexion et de compression sont provoquées par les actions calculées aux ELU, états limites ultimes. La somme des deux rapports (contrainte de flexion divisée par la contrainte de résistance et contrainte de compression divisée par la contrainte de résistance) doivent rester inférieure à 1. Le taux de travail de la flexion est majorer par le coefficient k_{crit} (risque de déversement) et le taux de travail de la compression est majorer par le coefficient k_c (risque de flambement). Le taux de travail de la flexion peut être élevé au carré lorsque le moment de flexion est portée par l'axe y et le risque de flambement est lié à l'axe z.

$$\text{Le taux de travail est : } \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} * f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,o,d}}{k_{c,z} * f_{c,o,d}} \leq 1$$

Avec :

$\sigma_{c,o,d}$: Contrainte de compression axiale provoquée par les actions en N/mm².

$f_{c,o,d}$: Contrainte de résistance de compression axiale en N/mm².

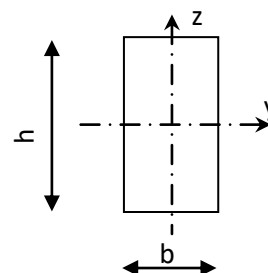
$k_{c,z}$: Coefficient d'instabilité lié au risque de flambement autour de l'axe z.

$\sigma_{m,y,d}$: Contrainte de flexion provoquée par les actions en N/mm² avec un moment de flexion porté par l'axe y.

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

k_{crit} : Coefficient d'instabilité provenant du déversement.

Repère de la section adopté par l'Eurocode



4.2 Contrainte provoquée par les actions $\sigma_{m,y,d}$

La contrainte de flexion provoquée par la charge est calculée par la formule : $\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{f,y}}{\frac{I_{G,y}}{V}}$

$M_{f,y}$: moment de flexion maximum, pour un élément sur deux appuis avec une charge uniformément répartie,
 $M_{f,y} = qL^2/8$

$L = 8000$ mm, distance entre appuis, soit la hauteur libre du poteau.

$I_{G,y}/V$: module d'inertie, $bh^2/6$ pour une section rectangulaire avec le repère de l'eurocode.

La formule devient : $\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{f,y}}{\frac{I_{G,y}}{V}} = \frac{6qL^2}{8bh^2}$

Tableau C : contrainte de flexion subit par le poteau en fonction de la combinaison d'action

Combinaison à l'ELU	Effort perpendiculaire au poteau en kN/m ou N/mm (provoqué par le vent W)	contrainte de flexion axiale en N/mm ²
$q_4 = 1,35 G + 1,5 S + 0,6 * 1,5 W_+$	$0,6 * 1,5 * 1,68 = 1,512$	$\sigma_{m,y,d} = \frac{6 * 1,512 * 8000^2}{8 * 90 * 315^2} = 8,1$
$q_5 = 1,35 G + 1,5 W_+ + 0,5 * 1,5 S$	$1,5 * 1,68 = 2,52$	$\sigma_{m,y,d} = \frac{6 * 2,52 * 8000^2}{8 * 90 * 315^2} = 13,5$

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

La contrainte de résistance du bois dépend de la contrainte caractéristique, de la classe de service (humidité du bois), de la charge de plus courte durée de la combinaison d'action, de l'effet système et de la plus grande dimension de la section.

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

- $f_{m,k} = 24$ N/mm², contrainte caractéristique de résistance en flexion (tableau 6).
- $k_{mod} = 1,1$ pour les deux combinaisons, coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée (le vent) et de la classe de service (tableau 8).
- $\gamma_M = 1,25$, coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau (tableau 7).
- $k_{sys} = 1$; le coefficient d'effet système est égale à 1,1 si plusieurs éléments porteurs de même nature et de même fonction avec un entraxe inférieur à 1,2 m (solives, fermes) sont sollicités par un même type de chargement réparti uniformément et avec un système capable de reporter les efforts sur les pièces adjacentes.
- $k_h = 1,08$ Coefficient de hauteur. Le coefficient k_h majore les résistances pour les hauteurs < 600 mm pour le bois lamellé-collé.

$$\begin{aligned} \text{si } h &\geq 600 \text{ mm} & k_h &= 1 \\ \text{si } h &< 600 \text{ mm} & k_h &= \min(1,1 ; (600/h)^{0,1}) \end{aligned}$$

soit $k_h = \min(1,1 ; (600/315)^{0,1}) = 1,07$, avec h la hauteur de la pièce en mm

$$f_{m,d} = 24 * \frac{1,1}{1,25} * 1 * 1,07 = 22,6 \text{ N/mm}^2$$

4.4 Coefficient d'instabilité provenant du déversement k_{crit}

Le déversement est un flambement latéral de la membrure comprimée. Il peut apparaître lorsque les appuis sont limités en torsion (sabots, encastrement dans un mur,...) et si l'élancement est important c'est-à-dire lorsque le rapport hauteur/ épaisseur est élevé et lorsque la membrure comprimée n'est pas maintenue. Le calcul du coefficient k_{crit} s'effectue à partir de la contrainte critique de flexion $\sigma_{m,crit}$ et de l'élancement relatif de flexion $\lambda_{rel,m}$.

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

La contrainte critique de flexion est définie par la formule : $\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 * E_{0,05} * b^2}{h * (l * k_{lef} + \Delta l)}$

- $E_{0,05} = 9600 \text{ N/mm}^2$, module axial au 5ième pourcentile ou caractéristique (voir le tableau 6).
- $h = 315 \text{ mm}$, hauteur de la pièce.
- $b = 90 \text{ mm}$, épaisseur de la pièce.
- $l = 8000 \text{ mm}$, longueur de la pièce
- $\Delta l = 2 \times h = 630 \text{ mm}$, 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} , coefficient fonction du type d'appui et du chargement, $k_{lef} = 0,9$;

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

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times 9600 \times 90^2}{315 \times (8000 \times 0,9 + 630)} = 24,6 \text{ N/mm}^2$$

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

L'élancement relatif de flexion est défini par la formule $\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,critique}}}$

- $\sigma_{m,crit} = 24,6 \text{ N/mm}^2$, contrainte critique de flexion.
- $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$, contrainte de flexion caractéristique (voir le tableau 6).

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{24}{24,6}} = 0,99$$

4.4.3 Calcul du coefficient k_{crit}

Si $\lambda_{rel,m} \leq 0,75$ $k_{crit} = 1$, pas de déversement

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

Si $1,4 < \lambda_{rel,m}$ $k_{crit} = 1 / \lambda_{rel,m}^2$

$$\lambda_{rel,m} = 0,66$$

$$\text{donc } k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times 0,99 = 0,82$$

Remarque : Si le déplacement latéral de la face comprimée est évité sur toute sa longueur (entretoises rigides ou panneaux fixés comme un voile travaillant), le coefficient k_{crit} peut être pris égal à 1.

4.5 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 en Newton,
- A = 90 x 315, aire de la pièce en mm²

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

Tableau D : contrainte de compression axiale repris par le poteau en fonction de la combinaison d'action

Combinaison à l'ELU	Effort normal en kN (provoqué par G et S)	contrainte de compression axiale en N/mm ²
$q_4 = 1,35 G + 1,5 S + 0,6 * 1,5 W_+$	$1,35 * 4,06 + 1,5 * 7,2 = 16,281$	$\sigma_{c,0,d} = \frac{16281}{90 * 315} = 0,57 \text{ N/mm}^2$
$q_5 = 1,35 G + 1,5 W_+ + 0,5 * 1,5 S$	$1,35 * 4,06 + 0,5 * 1,5 * 7,2 = 10,881$	$\sigma_{c,0,d} = \frac{10881}{90 * 315} = 0,38 \text{ N/mm}^2$

4.6 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), de la charge de plus courte durée de la combinaison d'action.

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

- $f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$, contrainte caractéristique de résistance en compression axiale pour un résineux classé GL24h (tableau 6).
- k_{mod} = coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée de la combinaison d'actions et de la classe de service (tableau 8)
- $\gamma_M = 1,25$, coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau (tableau 7).

Le tableau E précise la valeur de la contrainte de résistance en compression axiale en fonction de la combinaison d'action.

Tableau E : Valeur de la contrainte de résistance en compression axiale en fonction de la combinaison d'action

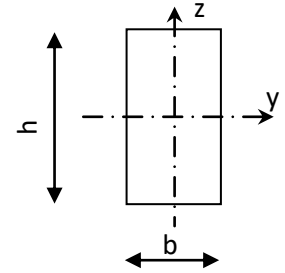
Combinaison à l'ELU	Durée de la charge	Coefficient k_{mod}	Contrainte de résistance en compression axiale en N/mm ²
$q_4 = 1,35 G + 1,5 S + 0,6 * 1,5 W_+$	Instantanée	1,1	$f_{c,0,d} = 24 * \frac{1,1}{1,25} = 21,1 \text{ N/mm}^2$
$q_5 = 1,35 G + 1,5 W_+ + 0,5 * 1,5 S$			

4.7 Coefficient de flambement k_c ,

Etape 1 : Sélection de l'élancement mécanique du poteau par rapport aux axes z et y.

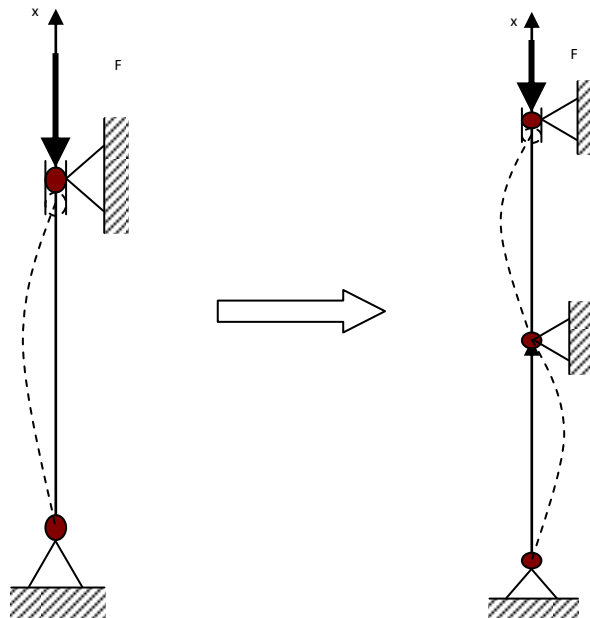
La figure 2 définit le repère choisi pour travailler avec l'Eurocode.

Repère de la section adopté par l'Eurocode



Le poteau reçoit un renfort au milieu de la hauteur pour renforcer son épaisseur, la longueur de flambement est divisée par deux pour la faible inertie, soit l'axe de rotation z. Pour que ce renfort soit efficace, les efforts d'anti flambement doivent être reportés jusqu'à une zone stabilisée (travée de stabilité par exemple).

Renfort de l'épaisseur du poteau



L'élancement mécanique est défini par la formule : $\lambda_y = \frac{l_{f,y}}{i_y}$ et $\lambda_z = \frac{l_{f,z}}{i_z}$ avec

$l_{f,y} = m * l_{g,y}$, longueur de flambement en mm.

$m = 1$, influence des assemblages des extrémités sur la longueur de flambement

$l_{g,y}$: longueur libre du poteau par rapport à l'axe y, soit 8000 mm

$l_{f,z} = m * l_{g,z}$, longueur de flambement en mm.

$m = 1$

$l_{g,z}$: longueur libre du poteau par rapport à l'axe z, soit avec le renfort au milieu de la hauteur $8000/2 = 4000$ mm

$i = \sqrt{\frac{I_G}{A}}$, avec le repère défini par l'Eurocode,

$$i_z = \sqrt{\frac{I_{Gz}}{A}} = \sqrt{\frac{b^3 h}{12bh}} = \frac{b}{\sqrt{12}} \text{ et } i_y = \sqrt{\frac{I_{Gy}}{A}} = \sqrt{\frac{h^3 b}{12bh}} = \frac{h}{\sqrt{12}}$$

L'élancement devient pour l'axe z : $\lambda_z = \frac{m \cdot l_{g,z} \cdot \sqrt{12}}{b} = \frac{1 \cdot 4000 \sqrt{12}}{90} = 154$

L'élancement devient pour l'axe y : $\lambda_y = \frac{m \cdot l_{g,y} \cdot \sqrt{12}}{h} = \frac{1 \cdot 8000 \sqrt{12}}{315} = 88$

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

Etape 2 : Vérification du risque de flambement avec le calcul de l'élancement relatif du poteau par rapport à l'axe z.

L'élancement relatif est défini par la formule : $\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$, avec

- $f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$, contrainte caractéristique de résistance en compression axiale (tableau 6).
- $E_{0,05} = 9400 \text{ N/mm}^2$, module axiale au 5^{ième} pourcentile ou caractéristique (tableau 6).

$$\lambda_{rel,z} = \frac{154}{\pi} \sqrt{\frac{24}{9600}} = 2,45$$

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

Etape 3 : Calcul du coefficient d'instabilité lié au flambage par rapport à axe z.

Pour définir le coefficient d'instabilité il faut calculer un coefficient intermédiaire :

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

$\beta_c = 0,1$ pour le bois lamellé-collé, LVL et Bois Massif Reconstitué (défaut de rectitude $< \frac{1}{500}$ de la portée). Pour du bois massif, β_c serait égale à 0,2 (défaut de rectitude $< \frac{1}{300}$ de la portée).

$$k_z = 0,5[1 + 0,1(2,45 - 0,3) + 2,45^2] = 3,61$$

Le coefficient d'instabilité est défini par la formule : $k_{c,z} = \frac{1}{\left(k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}\right)}$

$$k_{c,z} = \frac{1}{\left(3,61 + \sqrt{3,61^2 - 2,45^2}\right)} = 0,16$$

4.8 Taux de travail des sollicitations composées (compression et flexion)

Le taux de travail est : $\left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} * f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1$

Le Tableau F précise le taux de travail pour une contrainte de flexion et de compression subit par le poteau en fonction de la combinaison d'action.

Tableau F : Taux de travail pour une contrainte de flexion et de compression.

Combinaison à l'ELU	Taux de travail
$q_4 = 1,35 \text{ G} + 1,5 \text{ S} + 0,6 * 1,5 \text{ W}_+$	$\left(\frac{8,1}{0,82 * 22,6} \right)^2 + \frac{0,57}{0,16 * 21,1} = 0,36$
$q_5 = 1,35 \text{ G} + 1,5 \text{ W}_+ + 0,5 * 1,5 \text{ S}$	$\left(\frac{13,5}{0,82 * 22,6} \right)^2 + \frac{0,38}{0,16 * 21,1} = 0,64$

Remarque : si l'on néglige la compression le taux de travail devient $\frac{13,5}{0,82 * 22,6} = 0,73$, ce qui est supérieure à 0,64. Il est donc dimensionnant à l'ELU.

Le critère est vérifié car les taux de travail des sollicitations sont inférieurs à 1.

5 Vérification à l'Etat Limite de Service (ELS).

L'état limite de service est vérifié lorsque les déformations ne dépassent pas une valeur limite réglementaire. Les vérifications à l'ELS concernent la déformation sous charge variable uniquement car seul le vent provoque de la flexion. La déformation instantanée sous charge variable est provoquée par le vent.

Le taux de déformation est $\frac{U_{inst(Q)}}{W_{inst(Q)}} \leq 1$, avec :

- $U_{inst(Q)}$: Flèche instantanée provoquée par le vent.
- $W_{inst(Q)}$: Flèche instantanée limite réglementaire sous charge variable.

La flèche instantanée est calculée avec la charge perpendiculaire au rampant $q = 1,68 \text{ kN/m}$ (voir le paragraphe 2.3 Les effets du vent). La solive a une charge symétrique et uniforme, la flèche est définie par la formule :

$$U_{inst(Q)} = \frac{5 \times q_{inst(Q)} \times L^4}{384 \times E_{0,mean} \times I}$$

Avec

- $q_{inst(Q)} = 1,68 \text{ kN/m} = 1,68 \text{ N/mm}$, charge linéique provoquée par les actions variables.
- $L = 8000 \text{ mm}$, distance entre appuis du poteau.
- $E_{0,mean} = 11,6 \text{ kN/mm}^2 = 11500 \text{ N/mm}^2$, module moyen axial précisé dans le tableau 5.
- I : moment quadratique en mm^4 , pour une section rectangulaire sur chant, $I = bh^3/12$
- $h = 315 \text{ mm}$, hauteur de la pièce.
- $b = 90 \text{ mm}$, épaisseur de la pièce.

La formule devient : $U_{inst(Q)} = \frac{5 \times q_{inst(Q)} \times L^4 \times 12}{384 \times E_{0,mean} \times b \times h^3} = \frac{5 \times 1,68 \times 8000^4 \times 12}{384 \times 11500 \times 90 \times 315^3} = 33 \text{ mm}$

La valeur limite réglementaire $W_{\text{inst}(Q)}$ est définie dans le tableau 9. Elle est de $L/200 = 8000/200 = 40$ mm.

Remarque : 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.

Le taux de déformation est de : $\frac{33}{40} = 0,83 \leq 1$

Le critère est vérifié

6 Comparaison entre les critères de dimensionnement

Le tableau G fait la synthèse des critères vérifiés.

Tableau G : synthèse des critères vérifiés.

Critère vérifié	Combinaison	Taux de travail ou de déformation maximum
Contrainte de flexion et compression (ELU)	$1,35 G + 1,5 W_+ + 0,5 * 1,5 S$	0,64
Contrainte de flexion en négligeant la compression (ELU)	$1,5 W_+$	0,73
Flèche instantanée sous charge variable (ELS)	$1,5 W_+$	0,83

Le critère dimensionnant est la flèche instantanée sous charge variable à l'ELS.

En savoir plus

Construction bois : l'Eurocode 5 par l'exemple - Le dimensionnement des barres et des assemblages en 30 applications. Yves Benoit – Editions Eyrolles - Collection Eurocode

Calcul des structures en bois : Guide d'application de l' Eurocodes 5 (structures bois) et de l'Eurocode 8 (séismes). Yves Benoit, Bernard Legrand, Vincent Tastet – Editions Eyrolles - Collection Eurocode

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	–

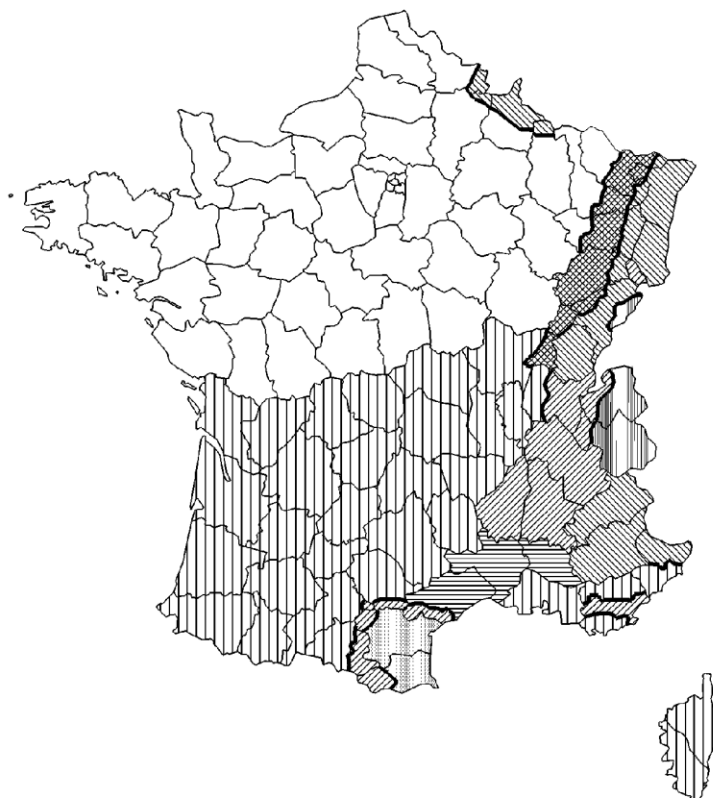
(1) q_k sur une surface rectangulaire ($A \times B$) de 10 m² telle que $A/B \leq 2$.

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.

La 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

Tab. 9. 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. 10. 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 $H_{bois} < 13 \%$ (local chauffé)	2 $13 \% < H_{bois} < 20 \%$ (sous abri)	3 $H_{bois} > 20 \%$ (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.