

# Vérification aux eurocodes d'une solive d'un plancher

La justification d'une solive exige des vérifications à l'état limite ultime et à l'état limite de service. La première étape consiste à définir les actions, c'est-à-dire les charges de structure et les charges d'exploitation. Puis il faut déterminer les combinaisons d'actions, qui simulent les différentes situations de charge auxquelles les solives seront soumises au cours de leur vie. Ces combinaisons d'actions permettent de calculer à l'état limite ultime les contraintes de flexion, de cisaillement et de compression transversale ainsi que la déformation instantanée sous charges variables et la déformation totale à l'état limite de service.

## > Sommaire

- 1 • Hypothèses de calcul
- 2 • Détermination des actions
- 3 • Combinaisons d'actions
- 4 • Vérification à l'état limite ultime (ELU)
- 5 • Vérification à l'état limite de service (ELS)
- 6 • Comparaison des critères de dimensionnement
- 7 • Bibliographie
- 8 • Références

## 1 Hypothèses de calcul

Considérons le plancher d'une chambre. Les éléments structuraux sont des solives de  $175 \times 75$  mm, classées C18, avec un entraxe de 46 cm reposant sur des murs espacés de 4,6 m. La longueur du repos sur le mur est de 25 mm. Les solives supportent un panneau de grandes particules orientées (OSB) de 15 mm d'épaisseur et un parquet flottant de 12 mm d'épaisseur (fig. 1).

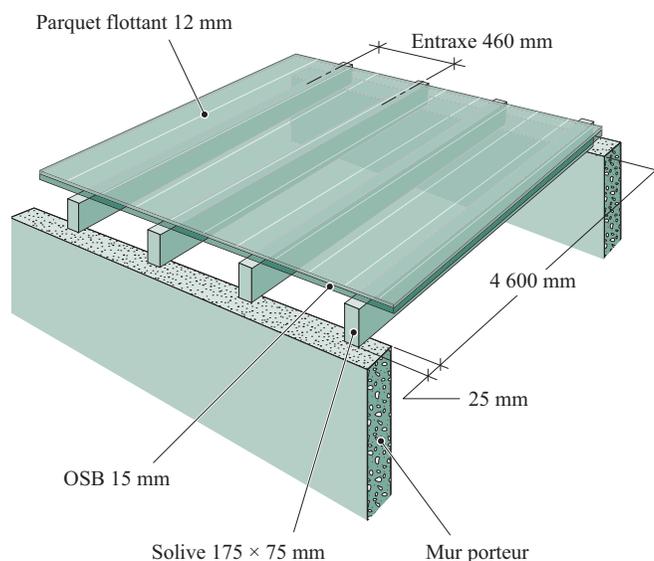


Fig. 1. Plancher de la chambre.

## Yves Benoit

Yves Benoit est enseignant au lycée des métiers du bâtiment (LMB) à Felletin, dans la Creuse, où il dispense des cours en BTS « Systèmes constructifs bois et habitats », et formateur auprès d'entreprises. Professionnel et amateur passionné du bois, il est l'auteur de plusieurs ouvrages aux Éditions Eyrolles ; 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 tels que Coffret de reconnaissance des bois de France* et *Le Grand livre de la machine à bois combinée*.

## 2 Détermination des actions

### 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.
- 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

La solive reprend 1/2 entraxe à gauche et 1/2 entraxe à droite, soit un entraxe complet ou bande de chargement ( $230 + 230 = 460 \text{ mm} = 0,46 \text{ m}$ ).

#### 2.1.2 Étape 2 : transformation de la masse en charge

Les solives sont classées C18 ; la masse volumique est de  $380 \text{ kg/m}^3$ .

Le calcul consiste à transformer la masse des éléments surfaciques (parquet contrecollé et OSB) en actions (ou charge) exprimées en  $\text{kN/m}^2$ , et la masse des éléments linéiques (solives) en actions exprimées en  $\text{kN/m}$ . Par simplification, l'accélération terrestre  $g$  est prise égale à  $10 \text{ m/s}^2$  (tab. 1).

#### 2.1.3 Étape 3 : détermination de la charge de structure ( $G$ ) par mètre de solive

La charge de structure surfacique est multipliée par la bande de chargement pour obtenir une charge linéique. Le poids (ou la charge) de la solive est ajouté.

La charge totale est  $G = (0,12 + 0,099) \times 0,46 + 0,05 = 0,151 \text{ kN/m}$ .

## 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.
- 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.

Les charges d'exploitation selon la destination du bâtiment sont indiquées dans le tableau 2.

Le plancher est situé dans un local d'habitation ; la charge d'exploitation uniformément répartie  $q_k$  est de  $1,5 \text{ kN/m}^2$ . La bande de chargement est de  $0,46 \text{ m}$ . La charge d'exploitation  $Q$  par mètre de solive est calculée comme suit :

$$Q = 1,50 \times 0,46 = 0,69 \text{ kN/m}$$

## 3 Combinaisons d'actions

Une première vérification consiste à confirmer que la sécurité des personnes sera assurée pendant toute la durée d'exploitation du bâtiment : c'est la vérification à l'état limite ultime (ELU). Une deuxième vérification permet de contrôler que les usagers pourront exploiter le bâtiment conformément à sa destination : c'est la vérification à l'état limite de service (ELS).

### 3.1 Combinaisons à l'état limite ultime (ELU)

Les combinaisons à l'ELU concernent la résistance de la structure. Il n'y a pas de risque de soulèvement ni de risque de neige exceptionnelle. Le risque incendie sera traité dans un prochain article. L'expression générale des combinaisons est donnée par la figure 2. La valeur des coefficients partiels est précisée dans le tableau 3.



#### Remarque

Il n'y a pas de coefficients statistiques lorsqu'il n'y a qu'une charge variable.

Tab. 1. Calculs de transformation de la masse en charge.

Élément	Masse	Formule	Calculs de la charge
Parquet contrecollé avec sous-couche	$12 \text{ kg/m}^2$	$(\text{kg/m}^2) \times (g/1000) = \text{kN/m}^2$	$12 \times (10/1000) = 0,12 \text{ kN/m}^2$
OSB	$660 \text{ kg/m}^3$	$[(\text{kg/m}^3 \times g)/1000] \times \text{épaisseur (m)} = \text{kN/m}^2$	$[(660 \times 10)/1000] \times 0,015 = 0,099 \text{ kN/m}^2$
Solive	$420 \text{ kg/m}^3$	$[(\text{kg/m}^3 \times g)/1000] \times \text{hauteur (m)} \times \text{épaisseur (m)} = \text{kN/m}$	$[(380 \times 10)/1000] \times 0,175 \times 0,075 = 0,05 \text{ kN/m}$

Tab. 2. Valeurs des charges d'exploitation en fonction du bâtiment (source : NF P 06-111-2/A1, clause 6.3.1.2<sup>(1)</sup>P, tableau 6.2 [1]).

Catégorie	Charge uniformément répartie $q_k$ (kN/m <sup>2</sup> )
<b>A – Logement</b>	
– Plancher	1,5
– Escalier	2,5
– Balcon	3,5
<b>B – Bureau</b>	
– Bureau	2,5
<b>C – Locaux publics</b>	
– C1 Locaux avec table (école, restaurant, etc.)	2,5
– C2 Locaux avec sièges fixes (théâtre, cinéma, etc.)	4
– C3 Locaux sans obstacles à la circulation (musée, salle d'exposition)	4
– C4 Locaux pour activités physiques (dancing, salle de gymnastique, etc.)	5
– C5 Locaux susceptibles d'être surpeuplés (salle de concert, terrasse, etc.)	5
<b>D – Commerces</b>	
– D1 Commerces de détail courants	5
– D2 Grands magasins	5
<b>E – Aires de stockage et locaux industriels</b>	
– E1 Surfaces de stockage (entrepôt, bibliothèque, ...)	7,5
– E2 Usage industriel	Cf. CCTP <sup>(1)</sup>
<b>H – Toitures</b>	
– Si pente $\leq 15$ % + étanchéité	1 <sup>(2)</sup>
– Autres toitures	0
<b>I – Toitures accessibles</b>	
– Pour les usages des catégories A à D	<sup>(3)</sup>
– Si aménagement paysager	$\geq 3$
<i>(1) Dans le cas des usages industriels, la valeur des charges n'étant pas codifiée, il convient de se référer au CCTP.</i>	
<i>(2) <math>q_k</math> sur une surface rectangulaire (<math>A \times B</math>) de 10 m<sup>2</sup> telle que <math>0,5 \leq A/B \leq 2</math>.</i>	
<i>(3) Charges identiques à la catégorie de l'usage.</i>	

Les combinaisons à envisager pour la résistance de la structure avec des charges descendantes ELU (STR) sont les suivantes :

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

$$q_1 = 1,35 G$$

$$q_1 = 1,35 \times 0,151 = 0,204 \text{ kN/m}$$

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

$$q_2 = 1,35 G + 1,35 Q_1$$

$$q_2 = 1,5 \times 0,151 + 1,5 \times = 1,239 \text{ kN/m}$$



### Remarque

La combinaison  $q_1$  deviendrait dimensionnante si  $G > 3,33 \times Q$ . Dans notre exemple, la structure est légère par rapport à la charge d'exploitation ( $G = 0,15 \times Q$ ).

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

Action permanente
Action variable de base
Action(s) variables(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. 2. Expression générale permettant de calculer les combinaisons à l'ELU.

Tab. 3. Coefficients partiels de l'action permanente d'un bâtiment courant (durée indicative d'utilisation de 50 ans).

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

### 3.2 Combinaisons à l'état limite de service (ELS)

Les combinaisons à l'ELS concernent la déformation sous charge variable et la déformation totale. L'expression générale permettant de calculer les combinaisons est donnée par la figure 3.

Le facteur de déformation  $k_{def}$  permet de tenir compte de la déformation différée ou du fluage ; il dépend du matériau et de la variation d'humidité du bois (tab. 4). Le facteur statistique  $\psi_2$  permet de définir la valeur de la charge quasi permanente qui provoque le fluage de la pièce (tab. 6).

- Valeur de la charge de calcul pour la déformation instantanée sous charge variable :

$$q = Q_1$$

$$q = 0,69 \text{ kN/m}$$

- Combinaisons pour la déformation totale avec une charge variable :

$$q = G + Q_1 k_{def} (G + \psi_{2,1} Q_1)$$

$$q = G + Q_1 + 0,6 (G + 0,3 Q_1)$$

$$q = 0,151 + 0,69 + 0,6 (0,151 + 0,3 \times 0,69) = 1,056 \text{ kN/m}$$

### 4 Vérification à l'état limite ultime (ELU)

La vérification à l'ELU consiste à vérifier la résistance en flexion au milieu de la solive, en cisaillement et en compression transversale sous les appuis.

La combinaison d'actions retenue est  $1,35 G + 1,5 Q$  (cf. remarque, § 3.1). Par suite :

$$q = 1,35 G + 1,5 Q = 1,239 \text{ kN/m} = 1,239 \text{ N/mm.}$$

Pour obtenir les sections de calcul, il faut diminuer de 2 % les dimensions commerciales. La section commerciale de  $175 \times 75$  devient donc :  $171 \times 73$ .

$$q = G + Q_1 + \sum_{n=2}^{\infty} \psi_{0,i} Q_i + k_{def} \left( G + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_{2,i} Q_i \right)$$

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

↑
↑
↑
↑

Facteur statistique
Facteur de déformation (fluage)
Facteur statistique

Pour la déformation instantanée (G)
Pour la déformation instantanée (Q)
Pour la déformation différée ou fluage

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

Fig. 3. Expression générale de calcul des combinaisons à l'ELS.

Tab. 4. Facteur de déformation ( $k_{def}$ ) selon la classe de service et l'humidité ( $H_{bois}$ ) du bois.

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

(1) On distingue 3 classes de service, numérotées 1, 2 et 3 (tab. 5).

(2) Le bois massif mis en œuvre à une humidité supérieure à 20 % va sécher sous charge et le fluage va augmenter.  $K_{def}$  est augmenté de 1,00.

(3) Sous contrainte élevée.

Tab. 5. Classes de service.

Classe de service	Utilisation du bois	Humidité d'équilibre* du local ( $H$ % 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

\* L'humidité d'équilibre est l'humidité relative qui doit régner dans une atmosphère environnante pour empêcher tout échange d'eau entre les matériaux et l'air.

Tab. 6. Coefficients statistiques en fonction des catégories de bâtiment et de l'altitude.

Charges	Action variable d'accompagnement $\psi_0$	Combinaison accidentelle (incendie) $\psi_1$	Fluage et combinaison accidentelle $\psi_2$
<b>Charges d'exploitation des bâtiments</b>			
Catégorie A : Habitations résidentielles	0,7	0,5	0,3
Catégorie B : Bureaux			
Catégorie C : Lieux de réunion		0,7	0,6
Catégorie D : Commerces			
Catégorie E : Stockages	1	0,9	0,8
Catégorie H : Toits	0	0	0
<b>Charges de neige</b>			
Altitude > 1 000 m	0,7	0,5	0,2
Altitude ≤ 1 000 m	0,5	0,3	0
<b>Action du vent</b>			
	0,6	0,2	0

### 4.1 Flexion

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

Le taux de travail est :

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

avec :

$\sigma_{m,d}$  : contrainte de flexion provoquée par les actions (N/mm<sup>2</sup>) ;

$f_{m,d}$  : contrainte de résistance de flexion calculée (N/mm<sup>2</sup>) ;

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

#### 4.1.1 Contrainte provoquée par les actions $\sigma_{m,d}$

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

$$\sigma_{m,d} = \frac{Mf_y}{\frac{I_{G,y}}{V}}$$

avec :

$Mf_y$  : moment de flexion maximum ; pour une poutre sur deux appuis avec une charge uniformément répartie,  $Mf_y = q L^2/8$  ;

$q = 1,239$  N/mm, charge linéique de poutre ;

$L = 4 600$  mm, distance entre appuis ;

$I_{G,y}/V$  : module d'inertie ;  $bh^2/6$  pour une section rectangulaire avec le repère de la figure 4.

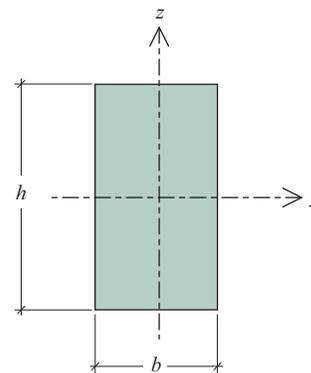


Fig. 4. Repère de la section adopté par l'Eurocode.

$$\sigma_{m,d} = \frac{Mf_y}{\frac{I_{G,y}}{V}} = \frac{6qL^2}{8bh^2} = \frac{6 \times 1,239 \times 4600^2}{8 \times 73 \times 171^2} = 9,22 \text{ N/mm}^2$$

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

La contrainte de résistance du bois  $f_{m,d}$  dépend des paramètres suivants :

- la contrainte caractéristique de résistance en flexion  $f_{m,k}$  (tab. 7 et tab. 8) ;
- le coefficient modificatif  $k_{mod}$  (tab. 9), fonction de la charge de plus courte durée de la combinaison d'actions ou charge d'exploitation, et de la classe de service ou d'humidité du bois ;

Tab. 7. Valeurs caractéristiques des bois massifs résineux et de peuplier (source : NF EN 338 [2]).

Symbole	Désignation	Unité	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
$f_{m,k}$	Contrainte de flexion	N/mm <sup>2</sup>	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		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 <sup>2</sup>	7	8	9	10	11	11,5	12	13	14
$E_{0,05}$	Module axial au 5 <sup>e</sup> 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
$\rho_k$	Masse volumique caractéristique	kg/m <sup>3</sup>	290	310	320	340	350	370	380	400	420
$\rho_{mean}$	Masse volumique moyenne		350	370	380	410	420	450	460	480	500

Tab. 8. Valeurs caractéristiques des bois lamellés-collés (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 <sup>2</sup>	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 compression axiale		24	26,5	29	31	21	24	26,5	29
$f_{c,90,g,k}$	Contrainte de compression 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 <sup>2</sup>	11,6	12,6	13,7	14,7	11,6	12,6	13,7	14,7
$E_{0,g,05}$	Module axial au 5 <sup>e</sup> 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 <sup>3</sup>	380	410	430	450	350	380	410	430

Tab. 9. Valeur du coefficient  $k_{mod}$  pour la durée de chargement du bois massif (source : NF EN 1995-1-1/A1 [3]).

Bois	Norme	Classe de service	Classe de durée de chargement				
			Action permanente	Action à long terme	Action à moyen terme	Action à court terme	Action instantanée
– Massif – Lamellé-collé – 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

– un coefficient partiel  $\gamma_M$  (tab. 10) qui tient compte de la dispersion du matériau ;

Tab. 10. Valeur du coefficient  $\gamma_M$ 

Éléments considérés		$\gamma_M$
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

– l'effet système  $k_{sys}$ , qui apparaît lorsque plusieurs éléments porteurs de même nature et de même fonction avec un entraxe inférieur à 1,2 m (solives, arbalétriers de fermettes) sont sollicités par un même type de chargement réparti uniformément et avec un système capable (le panneau dans notre exemple) de reporter les efforts sur les pièces adjacentes ;

– coefficient de hauteur  $k_h$  ; il est égal à 1 lorsque la plus grande dimension de la section (ou hauteur de la poutre) est supérieure à 150 mm. Le coefficient  $k_h$  majore les résistances pour les hauteurs inférieures à 150 mm pour le bois massif, et 600 mm pour le bois lamellé-collé. Le risque de défauts cachés dans la structure du bois est moins important pour les petites sections que pour les grandes.

La contrainte de résistance du bois répond à l'équation suivante :

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

#### Calcul du coefficient de hauteur d'un bois massif

Soit  $h$  la hauteur de la pièce (mm).

- Si  $h \geq 150$  mm alors  $K_h = 1$ .
- Si  $h \leq 150$  mm alors  $K_h = \min [1,3 ; (150/h)^{0,2}]$ .

#### Calcul du coefficient de hauteur d'un bois lamellé-collé

- Si  $h \geq 600$  mm alors  $K_h = 1$ .
- Si  $h \leq 600$  mm alors  $K_h = \min [1,1 ; (600/h)^{0,1}]$ .

Il s'ensuit que :

$$f_{m,d} = 18 \times \frac{0,8}{1,3} \times 1,1 \times 1 = 12,19 \text{ N/mm}^2$$

#### 4.1.3 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 (sabot, encastrement dans un mur, etc.) et si l'élanement est important, c'est-à-dire lorsque le rapport hauteur/épaisseur est élevé et lorsque la membrure comprimée n'est pas maintenue. Le coefficient  $k_{crit}$  est calculé à partir de la contrainte critique de flexion  $\sigma_{m,crit}$  et de l'élanement relatif de flexion  $\lambda_{rel,m}$ .

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

La contrainte critique de flexion est définie par la formule :

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

avec :

$E_{0,05} = 6\,000 \text{ N/mm}^2$ , module axial au 5<sup>e</sup> pourcentile (ou caractéristique) ;

$h = 171 \text{ mm}$ , hauteur de la pièce ;

$b = 73 \text{ mm}$ , épaisseur de la pièce ;

$l = 4\,600 \text{ mm}$ , longueur de la pièce ;

$\Delta l = 2 \times 173 = 346 \text{ mm}$  ; lorsque la pièce est chargée sur sa fibre comprimée,  $l_{ef}$  est augmentée de la valeur  $2h$  ; si la pièce est chargée sur sa partie tendue,  $l_{ef}$  est diminuée de  $0,5h$  ;

$k_{lef} = 0,9$  ; ce coefficient est défini dans le tableau 11.

Il s'ensuit que :

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times 6000 \times 73^2}{171(4600 \times 0,9 + 2 \times 171)} = 32,25 \text{ N/mm}^2$$

**Tab. 11. Valeurs du coefficient  $k_{ef}$  en fonction du type de charge et d'appui.**

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

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

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

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

avec :

$\sigma_{m,crit} = 32,5 \text{ N/mm}^2$ , contrainte critique de flexion ;

$f_{m,k} = 18 \text{ N/mm}^2$ , contrainte de flexion caractéristique.

Par suite :

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{18}{32,5}} = 0,74$$

**Calcul du coefficient  $k_{crit}$** 

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

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

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

$\lambda_{rel,m} = 0,74$  donc  $k_{crit} = 1$ .

**Remarque**

Lorsque le déplacement latéral de la face comprimée est évité sur toute sa longueur (entretoises ou voile travaillant fixé), le coefficient  $k_{crit}$  peut être pris égal à 1.

**4.1.4 Taux de travail**

Le taux de travail est :

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} = \frac{9,22}{1 \times 12,19} = 0,76 \leq 1$$

Le critère est vérifié.

**4.2 Cisaillement**

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

Le taux de travail est :

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1$$

avec :

$\tau_d$  : contrainte de cisaillement provoquée par les actions ( $\text{N/mm}^2$ ) ;

$f_{v,d}$  : contrainte de résistance de cisaillement calculée ( $\text{N/mm}^2$ ).

**4.2.1 Contrainte provoquée par les actions  $\tau_d$** 

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

$$\tau_d = \frac{k_{df} \cdot F_{v,d}}{k_{cr} \cdot b \cdot H_{ef}}$$

avec :

$k_f = 1,5$ , coefficient de forme de la section pour une section rectangulaire ;

$F_{v,d}$  : effort tranchant, exprimé en Newton ; une poutre sur deux appuis, avec une charge uniformément répartie, a un effort tranchant maximum au voisinage des appuis ; il a la même valeur que la réaction d'appuis,  $q/2$ , soit  $1,239 \times 4\,600/2 = 2\,850 \text{ N}$  ;

$h_{ef} = 171 \text{ mm}$ , hauteur réelle exposée au cisaillement ;

$b = 73 \text{ mm}$ , épaisseur de la pièce ;

$k_{cr} = 0,67$  ; coefficient tenant compte du risque de fente aux extrémités de la poutre, défini dans le tableau 12.

**Tab. 12. Valeur de  $k_{cr}$  en fonction du matériau, de la section et du chargement.**

Bois	Classe de service		
	1	2	3
– Massif dont une des dimensions de la section > 150 mm	0,67		
– Massif dont une des dimensions de la section < 150 mm – Lamellé-collé avec moins de 70 % de charge permanente par rapport à la charge totale	1	0,67	
– Lamellé-collé avec au moins 70 % de charge permanente par rapport à la charge totale	1	0,67	

Donc :

$$\tau_d = \frac{1,5 \times 2850}{73 \times 0,67 \times 171} = 0,52 \text{ N/mm}^2$$

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

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. Les tableaux 5 et 6 présentent les contraintes caractéristiques :

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

avec :

$f_{v,k} = 2 \text{ N/mm}^2$ , contrainte caractéristique de résistance en flexion ;  
 $k_{mod} = 0,8$ , coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée (la charge d'exploitation) et de la classe de service ;  
 $\gamma_M = 1,3$ , coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau ;

soit :

$$f_{v,d} = 2 \frac{0,8}{1,3} = 1,23 \text{ N/mm}^2$$

### 4.2.3 Taux de travail

Le taux de travail est :

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = \frac{0,52}{1,23} = 0,43 \leq 1$$

Le critère est vérifié.

## 4.3 Compression sous les appuis

La contrainte de compression transversale provoquée par les actions doit être inférieure ou égale à la contrainte de résistance de compression transversale. Dans certains cas, la contrainte de résistance peut être augmentée du coefficient  $k_{c,90}$ .

Le taux de travail est :

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90cd}} \leq 1$$

avec :

$\sigma_{c,90,d}$  : contrainte de compression transversale provoquée par les actions en  $\text{N/mm}^2$  ;

$f_{c,90,d}$  : contrainte de résistance de compression transversale en  $\text{N/mm}^2$  ;

$k_{c,90}$  : coefficient majorant la contrainte de résistance.

### 4.3.1 Contrainte provoquée par les actions, $\sigma_{c,90,d}$

La contrainte de compression transversale provoquée par la charge est calculée avec la formule :

$$\sigma_{c,90cd} = \frac{F_{c,90cd}}{b l_{ef}}$$

avec :

$F_{c,90,d}$  : effort de compression en Newton, soit la réaction aux appuis, pour une poutre sur deux appuis avec une charge uniformément répartie,  $F_{c,90cd} = \frac{qL}{2} = \frac{1,239 \cdot 4600}{2} = 2850 \text{ N}$  ;

$q = 1,239 \text{ N/mm}$ , charge linéique de poutre ;

$L = 4600 \text{ mm}$ , distance entre appuis ;

$b : 73 \text{ mm}$ , épaisseur de la pièce ;

$l_{ef}$  : longueur efficace de l'appui de la pièce en mm,  $l_{ef} = l + c_1 + c_2 = 25 + 0 + 25 = 50 \text{ mm}$  ;

$c_1$  et  $c_2 = \min [30 ; a ; l ; 0,5l_1]$  soit  $c_1 = \min [30 ; 0 ; 50 ; \text{sans objet}] = 0$  et  $c_2 = \min [30 ; \text{sans objet} ; 25 ; 0,5 \times 4600]$ .

$c_1 = 0 \text{ mm}$ , majoration en mm à gauche de l'appui de gauche ( $a$  sur la figure 2) ;

$c_2 = 25 \text{ mm}$ , majoration en mm à droite de l'appui de gauche ( $l_1$  les figures 5 et 6) ;

$l = 25 \text{ mm}$ , la longueur de l'appui en mm ;

$l_1 = 4600 \text{ mm}$ , la distance entre deux charges ponctuelles ;

$a = 0 \text{ mm}$ , la distance entre l'extrémité de la poutre et une charge ponctuelle ( $a$  sur la figure 6).

Donc :

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{2850}{73 \cdot 50} = 0,78 \text{ N/mm}^2$$

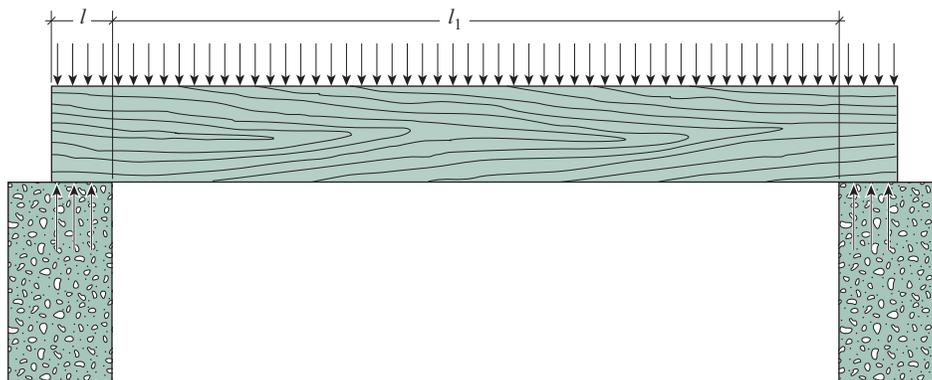
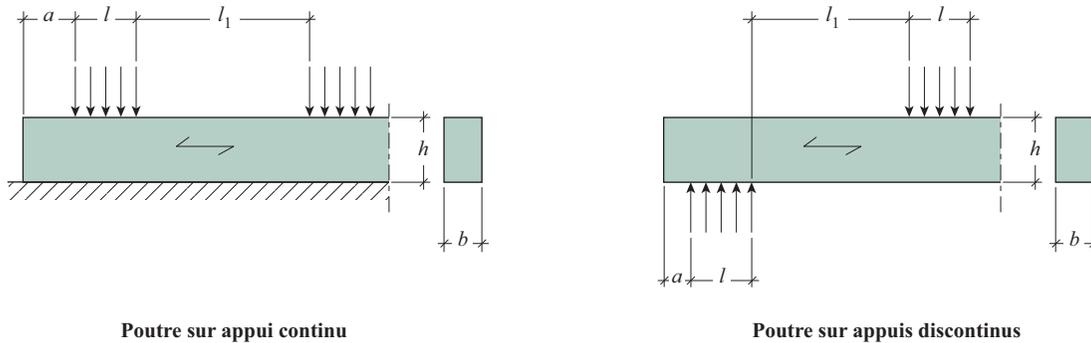


Fig. 5. Définition des distances  $l$  et  $l_1$  de la solive.

Fig. 6. Définition des distances  $a$ ,  $l$  et  $l_1$  de la solive (cas général).**Remarque**

En retournant la poutre sur appuis continus (à gauche), nous obtenons une poutre sur appuis discontinus uniformément chargée.

**4.3.2** Contrainte de résistance du bois  $f_{c,90,k}$ 

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. Les tableaux 5 et 6 présentent les contraintes caractéristiques,

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

avec :

$f_{c,90,k} = 2 \text{ N/mm}^2$ , contrainte caractéristique de résistance en flexion ;

$k_{mod} = 0,8$ , coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée (la charge d'exploitation) et de la classe de service ;

$\gamma_M = 1,3$ , coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau.

$$f_{c,90cd} = 2,2 \times \frac{0,8}{1,3} = 1,35 \text{ N/mm}^2$$

**4.3.3** Coefficient permettant de majorer la contrainte de résistance  $k_{c,90}$ 

Le tableau 13 précise les cas où il est possible de majorer la contrainte de résistance. La distance  $l_1$  doit être supérieure ou égale à 2 fois la hauteur de la pièce ( $l_1 \geq 2h$ ).

Tab. 13. Valeur de  $k_{c,90}$ .

Type d'appui	Bois massif résineux	Bois lamellé-collé résineux
Continus	1,25	1,5
Discontinus	1,5	1,75

**4.3.4** Taux de travail

Le taux de travail est :

$$\frac{0,78}{1,5 \cdot 1,35} = 0,39 \leq 1$$

Le critère est vérifié.

**5** Vérification à l'état limite de service (ELS)

L'état limite de service est vérifié lorsque les déformations ne dépassent pas une valeur limite réglementaire. Le comportement des planchers doit aussi être vérifié vis-à-vis des vibrations. Les vérifications à l'ELS concernent la déformation sous charge variable et la déformation totale de la solive. Le tableau 14 mentionne les valeurs limites réglementaires des flèches.

**Remarques**

– La valeur limite des consoles et porte-à-faux est doublée. Elle est toujours supérieure à 5 mm.

Tab. 14. Valeurs limites réglementaires des flèches.

	Bâtiments courants			Bâtiments agricoles et similaires		
	$U_{inst(Q)}$	$U_{net,fin}$	$U_{fin}$	$U_{inst(Q)}$	$U_{net,fin}$	$U_{fin}$
<b>Chevrons</b>	-	$L/150$	$L/125$	-	$L/150$	$L/100$
<b>Éléments structuraux</b>	$L/300$	$L/200$	$L/125$	$L/200$	$L/150$	$L/100$

- Les panneaux de planchers et supports de toiture ont une valeur limite de flèche nette finale ( $U_{net,fin}$ ) 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.

### 5.1 Déformation instantanée sous charge variable $W_{inst(Q)}$

La déformation instantanée sous charge variable est provoquée par les charges d'exploitation. Le taux de déformation est :

$$\frac{W_{inst(Q)}}{U_{inst(Q)}} \leq 1$$

avec :

$W_{inst(Q)}$  : flèche instantanée provoquée par la charge d'exploitation ;

$U_{inst(Q)}$  : flèche instantanée limite réglementaire sous charge variable.

La flèche instantanée est calculée avec la charge  $q = 0,69$  kN/m (voir § 3.2). La solive a une charge symétrique et uniforme ; la flèche est définie par la formule :

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

avec :

$q_{inst(Q)} = 0,69$  kN/m = 0,69 N/mm, charge linéique provoquée par les actions variables ;

$L = 4\ 600$  mm, distance entre appuis ;

$E_{0,mean} = 9$  kN/mm<sup>2</sup> = 9 000 N/mm<sup>2</sup>, module moyen axial précisé dans le tableau 5 ;

$I$  : moment quadratique en mm<sup>4</sup>, pour une section rectangulaire sur chant,  $I = bh^3/12$  ;

$h = 171$  mm, hauteur de la pièce ;

$b = 73$  mm, épaisseur de la pièce.

La formule devient :

La valeur limite réglementaire  $U_{inst(Q)}$  est définie dans le tableau 11. Elle est de  $L/300 = 4\ 600/300 = 15,3$  mm.

Le taux de déformation est de :

$$\frac{14,7}{15,3} = 0,96 \leq 1$$

Le critère est vérifié.

### 5.2 Déformation totale

La déformation totale  $W_{net,fin}$  est la somme de la flèche instantanée provoquée par les charges variables  $W_{inst(Q)}$ , la flèche instantanée provoquée par les charges permanentes  $W_{inst(G)}$  et la flèche différée provoquée par la durée de la charge et l'humidité du bois  $W_{creep}$ . Lorsqu'elle existe, il faut retrancher la contre-flèche fabriquée  $W_c$ .

$$W_{net,fin} = W_{inst} + W_{creep} - W_c$$

Le taux de déformation est :

$$\frac{W_{net,fin}}{U_{net,fin}} \leq 1$$

avec :

$W_{net,fin}$  : flèche nette finale ;

$U_{net,fin}$  : flèche nette finale limite réglementaire.

Par simplification, la combinaison  $q = G + Q_1 + k_{def} (G + \psi_{2,1} Q_1)$  permet de calculer directement la flèche nette finale. Le premier membre de l'équation,  $G$ , permet de calculer la flèche instantanée provoquée par les charges permanentes  $W_{inst(G)}$  ; le deuxième membre de l'équation,  $Q_1$ , permet de calculer la flèche instantanée provoquée par la charge d'exploitation  $W_{inst(Q)}$  et le troisième membre de l'équation,  $k_{def} (G + \psi_{2,1} Q_1)$ , permet de calculer la flèche différée provoquée par la durée de la charge et l'humidité du bois  $W_{creep}$ .

La flèche instantanée est calculée avec la charge  $q = G + Q_1 + 0,6 (G + 0,3 Q_1) = 0,056$  kN/m (voir § 3.2). La solive a une charge symétrique et uniforme. La flèche est définie par la formule :

$$W_{net,fin} = \frac{5 q_{net,fin} L^4}{384 E_{0,mean} I}$$

avec :

$q_{net,fin} = 1,056$  kN/m = 1,056 N/mm, charge de calcul linéique ;

$L = 4\ 600$  mm, distance entre appuis ;

$E_{0,mean} = 9$  kN/mm<sup>2</sup> = 9 000 N/mm<sup>2</sup>, module moyen axial précisé dans le tableau 5 ;

$I$  : moment quadratique en mm<sup>4</sup> ; pour une section rectangulaire sur chant,  $I = bh^3/12$ , avec  $h = 171$  mm, hauteur de la pièce et  $b = 73$  mm, épaisseur de la pièce.

La formule devient :

$$\begin{aligned} W_{net,fin} &= \frac{5 q_{net,fin} L^4}{384 E_{0,mean} b h^2} \\ &= \frac{5 \cdot 1,056 \cdot 4600^4}{384 \cdot 9000 \cdot 73 \cdot 171^2} = 22,49 \text{ mm} \end{aligned}$$

La valeur limite réglementaire  $U_{net,fin}$ , définie dans le tableau 9, est :  $L/200 = 4\ 600/200 = 23$  mm.

Le taux de déformation est de :

$$\frac{22,5}{23} = 0,98 \leq 1$$

Le critère est vérifié.



#### Remarques

- La vérification vis-à-vis des vibrations pourrait conduire à augmenter la hauteur de la section afin de rigidifier le plancher.
- Il est préférable de calculer la flèche provoquée par l'effort tranchant lorsque le taux de travail dépasse 0,95 ou si les charges sont importantes

et la distance entre appuis courte, c'est-à-dire si l'effort tranchant est important. La formule est :

$$W_{\text{effort tranchant}} = \frac{M f_{\text{max}}}{\frac{5}{6} G_{\text{mean}} b h}$$

avec :

$M f_{\text{max}} = qL^2/8$ , moment de flexion maximum (N.mm), la poutre sur deux appuis étant uniformément chargée ;

$G_{\text{mean}} = 560 \text{ N/mm}^2$ , module de cisaillement moyen ;

$b$  et  $h$  : épaisseur (73 mm) et hauteur (171 mm) de la pièce.

$$\begin{aligned} W_{\text{effort tranchant}} &= \frac{6 q l^2}{8.5 G_{\text{mean}} b h} \\ &= \frac{6 \cdot 1.056 \cdot 5000^2}{8.5 \cdot 560 \cdot 73 \cdot 220} = 0,44 \text{ mm} \end{aligned}$$

Le taux de déformation devient :

$$\frac{22,49 + 0,44}{23} = 0,99 \leq 1$$

Le critère est vérifié.

## 6 Comparaison des critères de dimensionnement

Le tableau 15 fait la synthèse des critères vérifiés.

Le critère dimensionnant est la flèche nette finale, à l'état limite de service (ELS).

Tab. 15. Synthèse des critères dimensionnels vérifiés.

Critères vérifiés	Taux de travail ou de déformation
Contrainte de flexion (ELU)	0,76
Contrainte de cisaillement (ELU)	0,43
Contrainte de compression transversale (ELU) (1)	0,39
Flèche instantanée sous charge variable (ELS)	0,96
Flèche nette finale (ELS)	0,99
(1) La contrainte de compression transversale est indépendante de la hauteur de la pièce mais dépend notamment de la longueur d'appui de la pièce sur le mur.	



### En savoir plus

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

## 7 Bibliographie

- NF EN 1990 (mars 2003 – indice de classement : P 06-100-1) : Eurocode 0 – Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures.
- 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
- 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<sup>e</sup> tirage (octobre 2009).
- 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.
- 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<sup>e</sup> 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.

## 8 Références

- [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 – Annexe nationale à la norme NF EN 1991-1-1 : Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments.
- [2] NF EN 338 (décembre 2009 - indice de classement : P 21-353) : Bois de structure - Classes de résistance.
- [3] NF EN 1995-1-1/A1 (octobre 2008 - indice de classement : P21-711-1/A1) : Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments.