

FORMATION CALCULS DE STRUCTURE

PRÉCAUTION D'UTILISATION : Le présent document constitue le support de la formation du 07/09/2026 . Il n'a pas été mis à jour depuis et peut comporter des informations erronées du fait des évolutions des référentiels et/ou des méthodes applicables. Il doit donc être utilisé uniquement à titre informatif.

François BRILLARD
biosources@alpes-contrôles.fr
 Responsable du pôle Bois et Matériaux Biosourcés
 Référent structure bois et ESSOC

SOMMAIRE

▪ Principe des Eurocodes	6
▪ Combinaisons d'actions	18
▪ Charges permanentes	39
▪ Charges d'exploitation	41
▪ Charges de neige	44
▪ Charges de vent	55
▪ Calcul des éléments à froid	65
▪ Flexion composée	90
▪ Flexion simple, compression transversale, cisaillement	103
▪ Bibliographie	229
▪ Référentiels	230
▪ Annexes : Points critiques	231
▪ Annexes : Divers	243

PRINCIPE DES EUROCODES

07/09/2026

Calculs de structures

6

Avant les Eurocodes

- **Règles BAEL 91** révisées 99 : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et construction en béton armé suivant la méthode des états limites (DTU P18-702, mars 1992, rév. 1999)
- **Règles BPEL 91** : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et construction en béton précontraint suivant la méthode des états limites (DTU P18-703, avril 1992)
- **Règles de calcul FB** : Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton (NF P92-701, décembre 1993)
- **Règles CM 66** additif 80 : Règles de calcul des constructions aciers (DTU P22-701, déc. 1966 + additif de 1980)
- **Règles CB71** : Règles de calcul et de conception des charpentes en bois (DTU P21-701, ed. juin 1984, 2^e tirage)
- **Règles BF 88** : Méthode de justification par le calcul de la résistance au feu des structures en bois (DTU P92-703, février 1988)
- **Règles AL76** : règles de conception et de calcul des charpentes en alliages d'aluminium (DTU P22-702, juillet 1976)

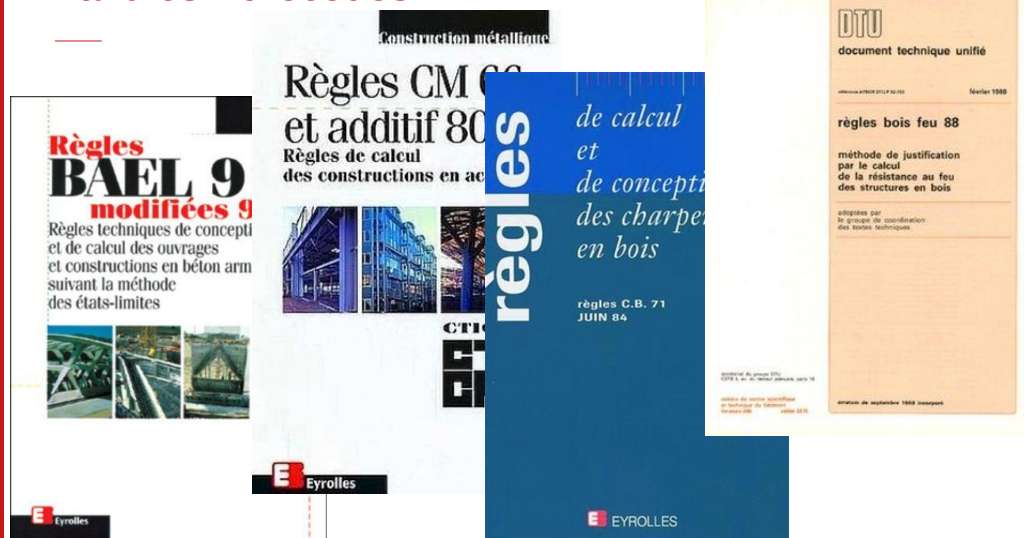
07/09/2026

Calculs de structures

7



Avant les Eurocodes



07/09/2026

Calculs de structures

8

Avant les Eurocodes

• Actions sur les structures :

- **Règles NV 65** : Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes (DTU P06-002 avril 2000, édition 2001)
- **Règles N 84** : Actions de la neige sur les constructions (complété par erratum de juin 1997) (DTU P06-006, sept. 1996)
- **Règles PS 92** : Règles de construction parasismique - Règles PS applicables aux bâtiments (NF P 06-013, déc. 1995)

• Atouts :

- Ces règles étaient des règles de calcul **ET** de conception

• Limites :

- Règles Françaises
- Chaque matériau avait ses propres règles de calcul, ses combinaisons de charges

07/09/2026

Calculs de structures

9

Eurocodes

- Eurocode 0 - Bases de calcul des structures
- Eurocode 1 - Actions sur les structures
- Eurocode 2 - Calcul des structures en béton
- Eurocode 3 - Calcul des structures en acier
- Eurocode 4 - Calcul des structures mixtes acier-béton
- Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois
- Eurocode 6 - Calcul des ouvrages en maçonnerie
- Eurocode 7 - Calcul géotechnique
- Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes
- Eurocode 9 - Calcul des structures en aluminium

07/09/2026

Calculs de structures

10

Eurocodes

- **Eurocode** = méthode de calculs commune aux pays de UE
- Actions et combinaisons d'actions communes à tous les Eurocodes
- **Chaque Eurocode comporte :**
 - Une annexe nationale applicable à chaque pays
 - Partie 1 applicable aux bâtiments :
 - Partie 1.1 : calculs à froid
 - Partie 1.2 : calculs à l'incendie
 - Partie 2 applicable aux ouvrages d'art (ponts, passerelles piétonnes...)

07/09/2026

Calculs de structures

11

Exemple pour le bois

CB 71

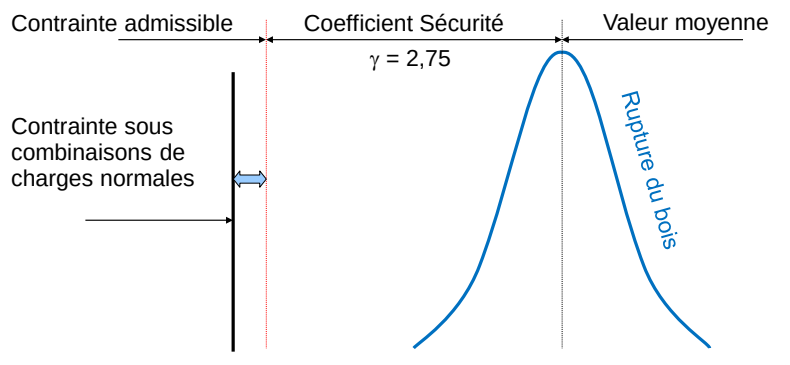
Eurocode 5

07/09/2026

Calculs de structures

12

CB 71 combinaison du 1^{er} genre (sous charges normales)

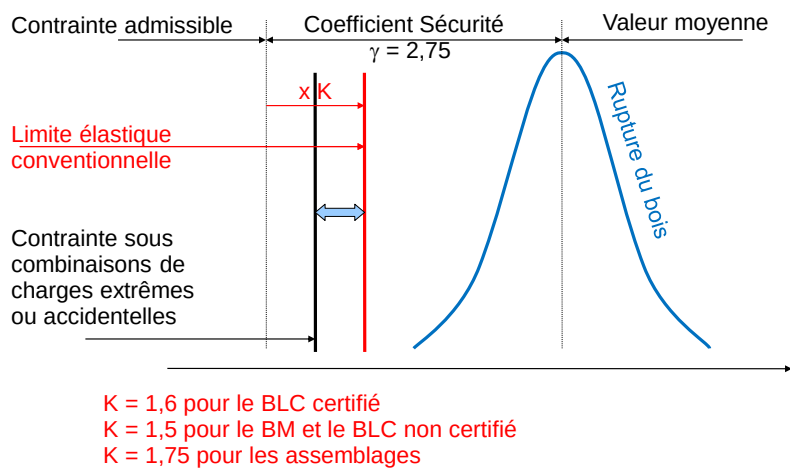


07/09/2026

Calculs de structures

13

CB71 combinaison du 2nd genre (sous charges extrêmes)

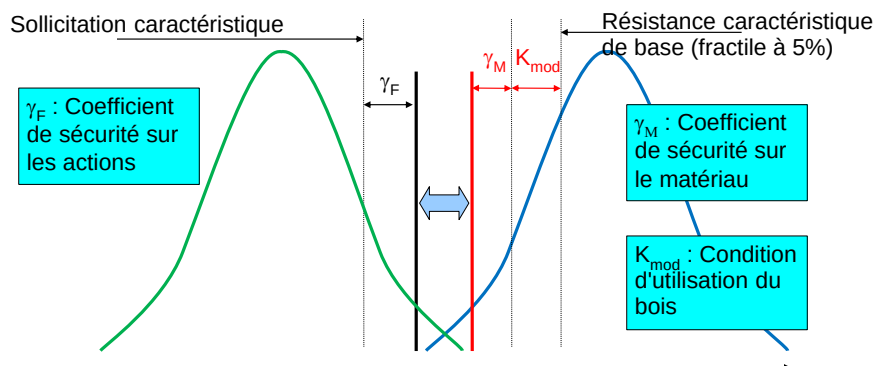


07/09/2026

Calculs de structures

14

Eurocode 5



07/09/2026

Calculs de structures

15

Eurocodes

Etats limites ultimes
=
Sécurité des ouvrages

Etats limites de service
=
Fonctionnement et exploitation
des ouvrages

07/09/2026

Calculs de structures

16

Eurocode 5

- EC0 ➡ Combinaison de charges
- EC1 ➡ Charges
- EC5 ➡ Structures bois

07/09/2026

Calculs de structures

17

COMBINAISONS D' ACTIONS : EUROCODE 0

07/09/2026

Calculs de structures

18

Types de Charges



07/09/2026

Calculs de structures

19

Actions permanentes G



Poids propre des éléments
du bâtiment



Poids propre d'éventuels
équipements fixes

07/09/2026

Calculs de structures

20

Actions variables Q



Charges d'exploitation Q



Charges de neige S



Charges de Vent W

07/09/2026

Calculs de structures

21

Actions accidentelles A



Choc



Incendie



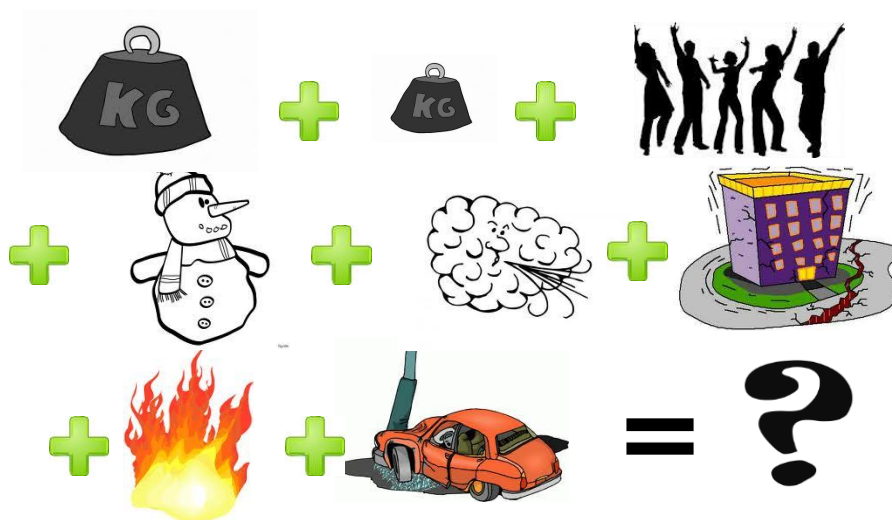
Action sismique AE

Type de Charges

[mise à jour
17/09/2022]

Symbole	Type	Désignation		Norme - règlement
G	Actions permanentes	Poids propre de la structure		NF EN 1991-1-1 (Mars 2003) NF P06-111-2 (Juin 2004) + A1 (mars 2009)
		Poids propre des équipements		
Q	Actions variables	Charges d'exploitation	Q	NF EN 1991-1-1 (Mars 2003) NF P06-111-2 (Juin 2004) + A1 (mars 2009)
		Charges de neige	S	NF EN 1991-1-3, Avril 2004 + A1 (Oct. 2015) NF EN 1991-1-3/NA (Mai 2007) + A1 (Juil. 2011) + A2 (juil. 2022)
		Charges de vent	W	NF EN 1991-1-4, Nov. 2005 + A1 (oct. 2010) NF EN 1991-1-4/NA (Mars 2008) + A1 (juil. 2011) + A2 (sept. 2012) + A3 (avril 2019)
A	Action accidentelles	Chocs, Incendie		
		Actions sismiques	AE	NF EN 1998-1 (Sept. 2005) + A1 (mai 2013) NF EN 1998-1/NA (Déc. 2013)

Combinaisons de Charges



07/09/2026

Calculs de structures

24

Combinaisons aux états limites

[EC0 § 6.4.1 & EC5
§ 7.3]

- Etat limite ultime (ELU) : Sécurité des personnes
 - STR : Résistance de la structure
 - EQU : Equilibre statique
 - GEO : Résistance du sol
 - Fatigue
- Etat limite de service (ELS) : Confort des personnes et limite de déformation

07/09/2026

Calculs de structures

25

ELU STR

- Résistance de la structure



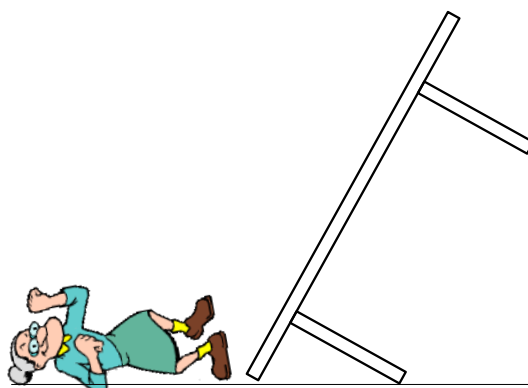
07/09/2026

Calculs de structures

26

ELU EQU

Equilibre statique de la structure



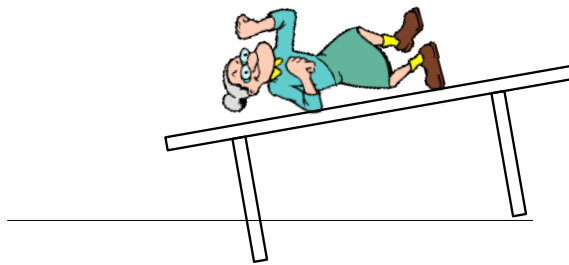
07/09/2026

Calculs de structures

27

ELU GEO

Résistance du sol



07/09/2026

Calculs de structures

28

ELU

- Sollicitation agissante $\leq$ capacité résistante

$$\sigma_d(F_k, \gamma_F, \psi_i) \leq f_d(f_k, \gamma_m, k_{\text{mod}}, k_{\text{geo}}, k_{\text{sys}})$$

F_k : Valeur
caractéristique
des actions

γ_F : Coef partiel de
sécurité relatif
aux actions

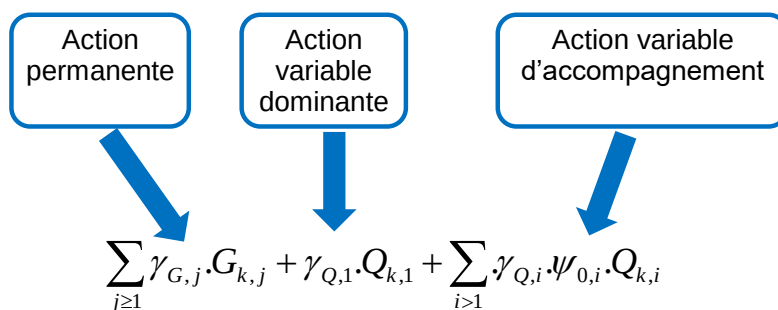
ψ_i : Coef de combinaison
des actions

07/09/2026

Calculs de structures

29

Combinaisons de charges ELU



07/09/2026

Calculs de structures

30

ELU - Coefficients partiels γ

	Action permanente (γ_{Gj})	Action variable ($\gamma_{Q,i}$)	
		Dominante	accompagnement
Effet favorable	$\gamma_{Gj,inf} = 1,00$	0	0
Effet défavorable	$\gamma_{Gj,sup} = 1,35$	1,5	1,5

07/09/2026

Calculs de structures

31

Combinaisons de charges ELU

■ ELU (EQU)

$$0,90.G_{k,\text{inf}} + \left| \frac{0}{1,50} \right| \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \left| \frac{0}{1,50} \right| \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

$$1,10.G_{k,\text{sup}} + \left| \frac{0}{1,50} \right| \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \left| \frac{0}{1,50} \right| \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

■ ELU (STR)

$$1,00.G_{k,\text{inf}} + \left| \frac{0}{1,50} \right| \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \left| \frac{0}{1,50} \right| \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

$$1,35.G_{k,\text{sup}} + \left| \frac{0}{1,50} \right| \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \left| \frac{0}{1,50} \right| \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

07/09/2026

Calculs de structures

32

Combinaisons de charges ELU

■ Situations accidentelles

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + \left| \frac{\psi_{1,1}}{\psi_{2,1}} \right| \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

■ Combinaisons sismiques

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_{Ed} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

07/09/2026

Calculs de structures

33

Facteurs ψ_i

Charges d'exploitation des bâtiments	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Catégorie A : habitation, zones 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 : Commerces	0,7	0,7	0,6
Catégorie E : Stockage	1,0	0,9	0,8
Catégorie F : Zones de trafic, véhicule de poids < 30 kN	0,7	0,7	0,6
Catégorie G : Zones de trafic, véhicule de poids compris entre 30 kN et 100 kN	0,7	0,5	0,3
Catégorie H : Toits	0	0	0

Autres charges	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Charges dues à la neige sur les bâtiments (altitude > 1000 m)	0,7	0,5	0,2
Charges dues à la neige sur les bâtiments (altitude ≤ 1000 m)	0,5	0,2	0
Charges dues au vent sur les bâtiments	0,6	0,2	0
Température (hors incendie)	0,6	0,5	0

Exemple pour une solive

Combinaison d'action pour justifier la structure d'un plancher d'un local d'habitation

Charges permanentes $G = 0,3 \text{ kN/m}^2$

Charges d'exploitation $Q = 1,5 \text{ kN/m}^2$

	Etat limite	Combinaison	Combinaison	Application numérique (kN/m²)
C1	ELU (STR)	$\gamma_{G,sup} \cdot G$	1,35 G	0,405
C2	ELU (STR)	$\gamma_{G,sup} \cdot G + \gamma_Q \cdot Q$	1,35 G + 1,5 Q	2,655

Exemple pour une panne

	Etat limite	Combinaison	Combinaison
C1	ELU (STR)	$\gamma_{G,sup} \cdot G$	1,35 G
C2	ELU (STR)	$\gamma_{G,sup} \cdot G + \gamma_Q \cdot Q$	1,35 G + 1,5 S
C3	ELU (STR)	$\gamma_{G,sup} \cdot G + \gamma_Q \cdot Q + \psi_0 \cdot \gamma_Q \cdot Q$	1,35 G + 1,5 S + 0,9 Wp
C4	ELU (STR)	$\gamma_{G,sup} \cdot G + \gamma_Q \cdot Q + \psi_0 \cdot \gamma_Q \cdot Q$	1,35 G + 1,5 Wp + 1,05 S
C5	ELU (STR)	$G + \gamma_A \cdot A$	G + Sa
C6	ELU (STR)	$\gamma_{G,inf} \cdot G + \gamma_Q \cdot Q$	G + 1,5 Wd
C7	ELU (EQU)	$\gamma_{G,inf} \cdot G + \gamma_Q \cdot Q$	0,9 G + 1,5 Wd

$\psi_0(\text{vent}) \cdot \gamma_Q = 0,6 \times 1,5 = 0,9$

$\psi_0(\text{Neige, } H > 1000 \text{ m}) \cdot \gamma_Q = 0,7 \times 1,5 = 1,05$

07/09/2026

Calculs de structures

36

Exemple pour une panne

Combinaison d'action pour justifier les éléments de la toiture d'un bâtiment situé à une altitude > 1000 m, en région A2 avec une pente de 52°.

Permanentes : G = 0,35 kN/m²

Vent pression : Wp = 0,1 kN/m²

Neige : S = 0,33 kN/m²

Vent dépression : Wd = -0,8 kN/m²

Neige accidentelle : Sa = 0,22 kN/m²

	Combinaison	AN (kN/m ²)	k _{mod} classe 2	γ_m	charge $\frac{\gamma_m}{k_{mod}}$ (kN / m ²)
C1	1,35 G	0,473	0,6	1,3	1,025
C2	1,35 G + 1,5 S	0,968	0,8	1,3	1,573
C3	1,35 G + 1,5 S + 0,9 Wp	1,058	1,1	1,3	1,250
C4	1,35 G + 1,5 Wp + 1,05 S	0,969	1,1	1,3	1,145
C5	G + Sa	0,570	1,1	1	0,518



La combinaison la plus défavorable n'est pas toujours celle qui donne les charges maxi.

07/09/2026

Calculs de structures

37



ACTIONS SUR LES STRUCTURES :
EUROCODE 1



07/09/2026

Calculs de structures

38



CHARGES PERMANENTES



07/09/2026

Calculs de structures

39

Charges permanentes

[EC1 P1-1 Annexe A]

- **Poids propre de la structure et des équipements fixes**
 - En bâtiment : accélération de pesanteur : $g = 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 10 \text{ m/s}^2$
 $\rightarrow 1 \text{ kg} \Leftrightarrow 1 \text{ daN}$
- **Exemples de poids volumiques :**
 - Béton armé : 2500 daN/m^3
 - Mortier de ciment : $1900 \text{ à } 2300 \text{ daN/m}^3$
 - Acier : 7850 daN/m^3
 - Bois massif : $380 \text{ à } 1100 \text{ daN/m}^3$, résineux standard $\sim 420 \text{ daN/m}^3$
 - Contreplaqué résineux : 500 daN/m^3
 - Panneaux de particules : 750 daN/m^3
- **Exemples de poids surfaciques :**
 - Tuiles mécaniques : 45 daN/m^2
 - Tuiles canal : 60 daN/m^2
 - Laine minérale déroulée : $2\text{-}6 \text{ daN/m}^2$
 - Plafond BA13 + rails : 13 daN/m^2

07/09/2026

Calculs de structures

40

CHARGES D'EXPLOITATION

07/09/2026

Calculs de structures

41

Charges d'exploitation

[EC1 P1-1 § 6.3.1 +
NF P 06-111-2]

Catégorie	q_k (KN/m²)	Q_k (KN)
A. Habitation, résidentiel (pièces bâtiments et maison individuelle, chambres, salles des hôpitaux, chambres d'hôtel et de foyers, cuisines et sanitaires) :		
• Plancher	1,5	2
• Escalier	2,5	2
• Balcon	3,5	2
B. Bureaux	2,5	4
C. Lieux de réunion (sauf catégories A, B et D)		
• C1 Espaces avec tables (écoles, cafés, restaurants, salles de banquets, de lecture, de réception)	2,5	3
• C2 Espaces avec sièges fixes (églises, théâtres, cinémas, salles de conférence, amphithéâtre, salle de réunion, salle d'attente)	4	4
• C3 Espaces sans obstacles à la circulation des personnes (musée, exposition, accès des bât. publics et administratifs, hôtels hôpitaux, gares)	4	4
• C4 Espaces permettant les activités physiques (dancings, salle de gymnastique, scènes)	5	7
• C5 Espaces pouvant accueillir des foules importantes (salles de concert, salle de sports, tribunes, terrasses, aires d'accès, quai de gare)	5	4,5

q_k : charge uniformément répartie
 Q_k : charge ponctuelle

Charges d'exploitation

[EC1 P1-1 § 6.3.1 +
NF P 06-111-2]

Catégorie	Q_k (KN/m²)	Q_k (KN)
D. Commerces		
• Commerces de détails courants	5	5
• Grands magasins	5	7
E. Aires de stockage et locaux industriels		
• E1 Surfaces de stockage (entrepôts, bibliothèques...)	7,5	7
• E2 usage industriel	CCTP	CCTP
H. Toitures inaccessibles sauf pour entretien et réparations courants**		
• H1 Toiture de pente intérieure à 15 % recevant une étanchéité	0,8*	1,5
• H2 Autres toitures	0	1,5
I. Toitures accessibles		
• I1 Usages des catégories A à D	Cf. A-D	Cf. A-D
• I2 Aménagement paysager	≥ 3	

q_k : charge uniformément répartie
 Q_k : charge ponctuelle
* : q_k sur une surface rectangulaire de 10 m² dont le rapport de la longueur sur la largeur est inférieur à 2
** : non cumulable avec la neige et le vent

CHARGES DE NEIGE

07/09/2026

Calculs de structures

44

Charges de neige pour altitude inférieure à 2000 m [AN § AN 1 § 1.1(3)]

[EC1 P1-3 § 4 +
Annexe nationale]

▪ Neige normale

$$S = \mu_{i(\alpha)} \times c_e \times c_t \times s_k + s_1$$

▪ Neige accidentelle

$$S = \mu_{i(\alpha)} \times c_e \times c_t \times s_{Ad} + s_1$$

avec

- $\mu_{i(\alpha)}$: coef. de forme (fonction du type de toiture, de la pente et de la redistribution de la neige sur la toiture)
- c_e : coef. d'exposition,
- c_t : **coef. thermique = 1** pour les bâtiments normalement isolés et chauffés,
- s_k : charge de neige au sol caractéristique (dépend de l'altitude)
- s_1 : charge supplémentaire pour faibles pentes
- s_{Ad} : charge de neige accidentelle au sol (**ne dépend pas de l'altitude**) [EC 1 P1-3 AN §4.3]

07/09/2026

Calculs de structures

45

Charges de neige : C_e

[EC1 P1-3 § 5.2 + AN § 5.2(7)]

- C_e coefficient d'exposition (généralement $C_e = 1$)

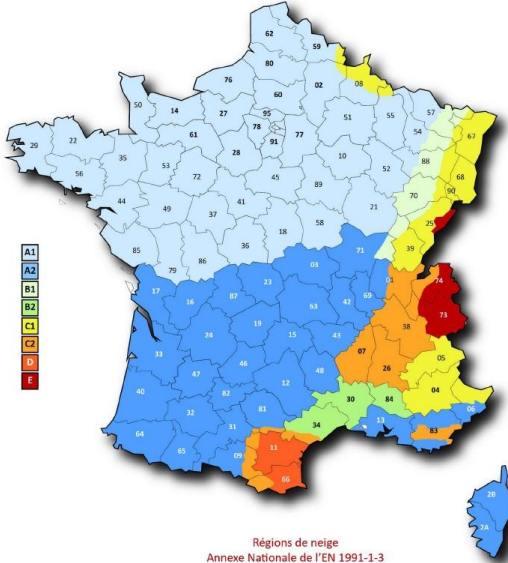
Topographie	C_e
Lorsque les conditions d'abri quasi permanentes des toitures dues aux bâtiments voisins conduisent à empêcher pratiquement le déplacement de la neige par le vent.	1,25
Dans tous les autres cas.	1,0

- C_t coefficient thermique (généralement $C_t = 1$)

Les bâtiments normalement chauffés étant systématiquement isolés, il convient de prendre $C_t = 1,0$ sauf spécifications particulières dûment justifiées du projet individuel. [EC1 P1-3 AN § 5.2(8)]

Charges de neige : S_k et S_{Ad}

[EC1 P1-3 § 6.3.1 + Annexe nationale]



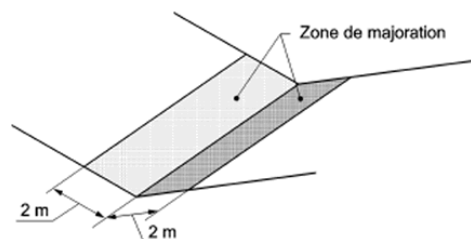
Régions	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D	E
Valeur caractéristique (S_k en kN/m^2) de la charge de neige sur le sol à une altitude inférieure à 200m	0.45	0.45	0.55	0.55	0.65	0.65	0.9	1.4
Valeur de calcul $S_{k,d}$ de la charge exceptionnelle de neige sur le sol	-	1	1	1.35	-	1.35	1.8	-
Loi de variation de la charge caractéristique pour une altitude supérieure à 200m	ΔS_1						ΔS_2	

Altitude A [en mètres]	$\Delta S_1(A)$ [en kN/m^2]	$\Delta S_2(A)$ [en kN/m^2]
entre 0 et 200	0	0
entre 200 et 500	$0,10 \frac{A-200}{100}$	$0,15 \frac{A-200}{100}$
entre 500 et 1000	$0,30 + 0,15 \frac{A-500}{100}$	$0,45 + 0,35 \frac{A-500}{100}$
entre 1000 et 2000	$1,05 + 0,35 \frac{A-1000}{100}$	$2,20 + 0,70 \frac{A-1000}{100}$

Charges de neige : s_1

[EC1 P1-3 § 5.2 +
Annexe nationale]

- s_1 : charge supplémentaire pour faible pente
 - zones dont la pente vis-à-vis de l'écoulement de l'eau est inférieure à 3 % -
> augmentation en cas de pluie de la densité de la neige (difficultés d'évacuation de l'eau)
 - -> majoration la charge de neige de $0,2 \text{ kN/m}^2$
 - majoration à la zone à faible pente + sur une distance de 2 mètres dans toutes les directions.
- Exemple : noue de pente < 3 %
entre toiture de pente > 3 %



07/09/2026

Calculs de structures

48

Charges de neige : Coefficient de forme $\mu(\alpha)$

[EC1 P1-3 § 5.3 +
Annexe nationale]

- Coefficient de forme μ dépendant de la pente de toiture

α (Angle du toit avec l'horizontale)	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1(\alpha)$	$\mu_1(0^\circ) \geq 0,8$	$\mu_1(0^\circ) \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0,0
$\mu_2(\alpha)$	0,8	$0,8 \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0,0
$\mu_3(\alpha)$	$0,8 + 0,8 \alpha/30$	1,6	--

- Si barre à neige en toiture : $\mu \geq 0,8$ [EC P1-3 § 5.3.2 & AN § 5.3.5(1)]

07/09/2026

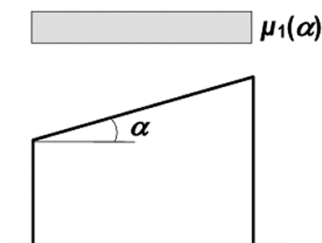
Calculs de structures

49

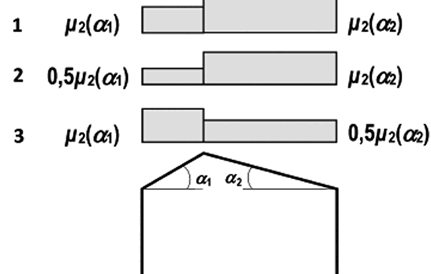
Charges de neige : Répartition de la neige

[EC1 P1-3 § 5.3 +
Annexe nationale]

■ Toiture monopente



Toiture à 2 versants



■ Si barre à neige en toiture : $\mu \geq 0,8$ [EC P1-3 § 5.3.2 & AN § 5.3.5(1)]

07/09/2026

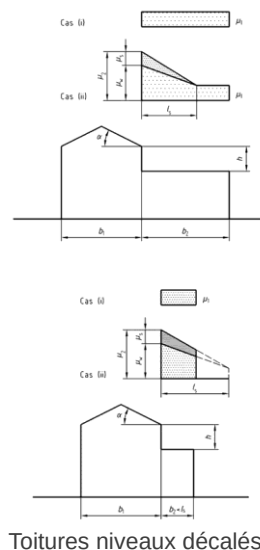
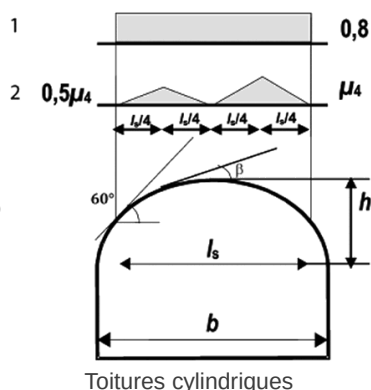
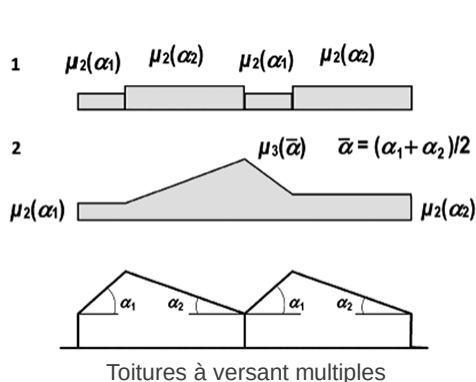
Calculs de structures

50

Charges de neige : Répartition de la neige

[EC1 P1-3 § 5.3 +
Annexe nationale]

■ Autres cas traités par l'EC1 P1-3



07/09/2026

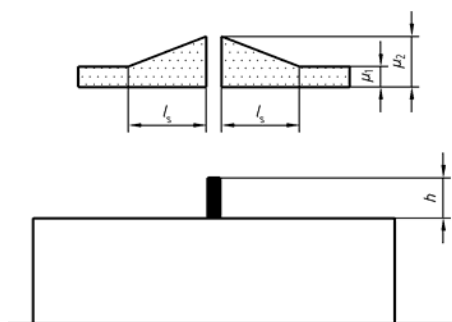
Calculs de structures

51

Charges de neige : Accumulations et effet locaux

[EC1 P1-3 § 6.2 +
Annexe nationale]

- Pas d'accumulation en zone A1, C1 et E [Annexe nat. § 1.1(3)]
- Pour les autres zone pas d'accumulation ou d'effets locaux de neige accidentelle
- Accumulation contre obstacles et saillies



07/09/2026

Calculs de structures

52

$$\mu_1 = 0,8$$

$$\mu_2 = y \times h / s_k \text{ ET } 0,8 \leq \mu_2 \leq 2,0$$

y : poids volumique neige = 2 kN/m³

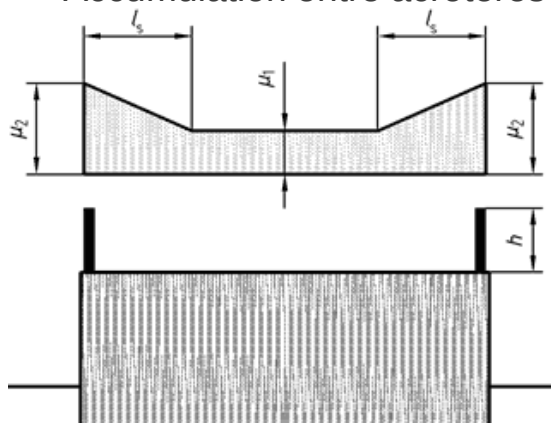
$$l_s = 2 \times h \text{ ET } 5 \text{ m} \leq l_s \leq 15 \text{ m}$$

h : hauteur saillie / obstacle

Charges de neige : Accumulations et effet locaux

[EC1 P1-3 § 5.3 +
Annexe nationale]

- Accumulation entre acrotères



07/09/2026 $\mu_2 \leq 1,6$ [EC1 P1-3 AN § 6.2(2)]

Calculs de structures

53

$$\mu_1 = 0,8$$

$$\mu_2 = y \times h / s_k \text{ ET } 0,8 \leq \mu_2 \leq 1,6$$

y : poids volumique neige = 2 kN/m³

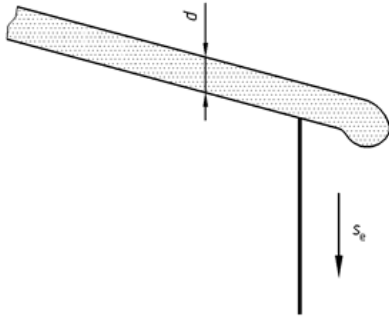
$$l_s = 2 \times h \text{ ET } 5 \text{ m} \leq l_s \leq 15 \text{ m}$$

h : hauteur saillie / obstacle

Charges de neige : Accumulations et effet locaux

[EC1 P1-3 § 6.3 +
Annexe nationale]

- Débords de toiture pour altitude > 900 m



$$S_e = k \cdot s^2 / y$$

$$k = 3/d \text{ ET } k \leq d \cdot y$$

d : épaisseur de neige mesurée verticalement

s : charge de neige en kN

y : poids volumique de neige de 3 kN/m³

S_e : charge de neige suspendue / ml

s : charge de neige non accumulé le plus sévère du versant

k : coefficient qui prend en compte l'irrégularité de forme de la neige

07/09/2026

Calculs de structures

54

CHARGES DE VENT

07/09/2026

Calculs de structures

55

Charges de vent

- Temps imparti trop limité pour aller très loin
 - 1^{er} approche meteodyn.com <http://ec1.meteodyn.com/index.php>
 - Pour approfondir :
 - [B1]
 - [EC1 P1-4 & AN]



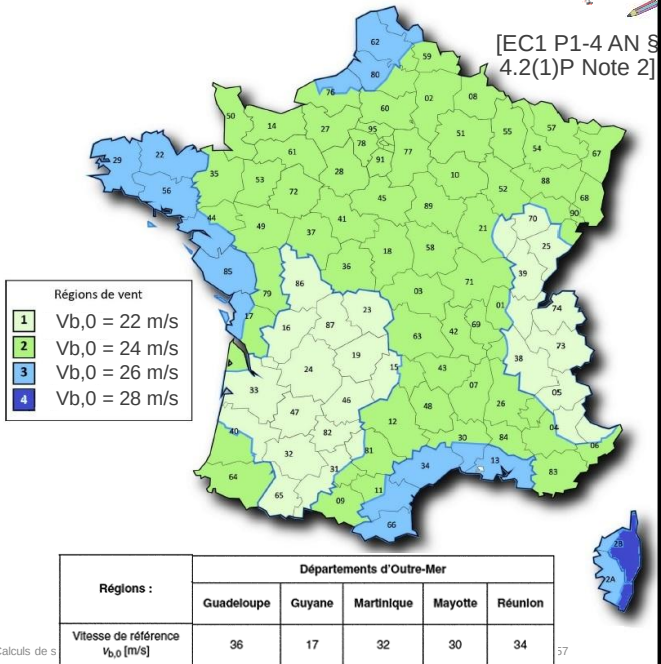
07/09/2026

Calculs de structures

56

Charges de vent

- Vitesse de référence :
 - $V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0} \sim V_b = V_{b,0}$
 - $V_{b,0}$: de référence à 10 m
 - C_{dir} : 1 par défaut, l'annexe nationale permet de diminuer en fonction de la direction du vent [EC1 P1-4 AN § 4.2 (2)P NOTE 2]
 - C_{season} : 1 par défaut, réduction possible d'avril à septembre bât. temporaires [EC1 P1-4 AN § 4.2 (2)P NOTE 3]



07/09/2026

Calculs de s

57

Charges de vent : coefficient de rugosité $c_r(z)$

[EC1 P1-4 AN § 4.2(1)P Note 2]

Rugosité :

Catégorie de terrain	z_0 [m]	z_{min} [m]
0 Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer ; lacs et plans d'eau parcourus par le vent sur une distance d'au moins 5 km	0,005	1
II Rase campagne, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments, etc.) séparés les uns des autres de plus de 40 fois leur hauteur	0,05	2
IIIa Campagne avec des haies ; vignobles ; bocage ; habitat dispersé	0,20	5
IIIb Zones urbanisées ou industrielles ; bocage dense ; vergers	0,5	9
IV Zones urbaines dont au moins 15 % de la surface sont recouverts de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m ; forêts	1,0	15

NOTE 1 Les catégories de terrain sont illustrées par les photographies aériennes des figures 4.6(NA) à 4.14(NA).

NOTE 2 Le coefficient de rugosité, fonction de la catégorie de terrain et de la hauteur z , est illustré à la figure 4.15(NA).

Charges de vent : coefficient de rugosité $c_r(z)$

[EC1 P1-4 AN § 4.3.2 (1)]



Rugosité 0 (mer) et IV (ville)



Rugosité II (rase campagne, aéroport)



Rugosité II (rase campagne)



Rugosité IIIa (campagne avec haies, bocage...)



Rugosité IIIb (boacge dense)



Rugosité IIIb (zone industrielle)

Charges de vent : coefficient de rugosité $c_r(z)$

[EC1 P1-4 AN § 4.3.2 (1)]



Rugosité IV (ville)



Rugosité IV (ville)



Rugosité IV (forêt)

- La rugosité peut s'examiner par secteur angulaire de 30° (direction considérée $\pm 15^\circ$) pour un rayon R fonction de la hauteur h du bâtiment : $R = 23 \cdot h^{1,2}$ avec $R > 300 \text{ m}$. [EC1 P1-4 AN § 4.3.2 (2)]

Charges de vent : coefficient de rugosité $c_r(z)$

[EC1 P1-4 AN § 4.3.2 (1)]

- Coefficient de rugosité $c_r(z)$
 - Pour $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$: $c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$
 - Pour $z \leq z_{\min}$: $c_r(z) = c_r(z_{\min})$
 - $c_r(z)$: coefficient de rugosité pour la hauteur z
 - z : hauteur considérée (souvent la hauteur du bât.) (m)
 - z_0 : longueur de rugosité (m) (cf. tableau)
 - k_r : paramètre de terrain (cf. tableau ci-contre)
 - $z_{\min}$: hauteur minimale (cf. tableau ci-avant)
 - $z_{\max}$: 200 m

Catégorie de terrain	z_0 [m]	k_r
0	0,005	0,162
II	0,05	0,190
IIIa	0,20	0,209
IIIb	0,5	0,223
IV	1,0	0,234

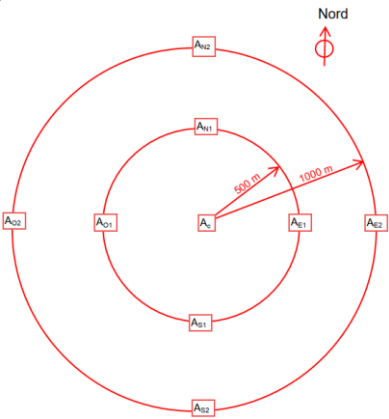
Charges de vent : coefficient d'orographie $c_0(z)$

[EC1 P1-4 AN § 4.3.2 (1)]

- Coefficient d'orographie $c_0(z)$
 - $C_0(z) = 1$ en terrain plat horizontal (sur 2 km de Ø)
 - Sinon détermination par relevés altimétriques :
 - A_c : altitude du lieu de la construction
 - A_m : altitude moyenne

$$A_m = \frac{2 \cdot A_c + A_{N1} + A_{N2} + A_{E1} + A_{E2} + A_{S1} + A_{S2} + A_{O1} + A_{O2}}{10}$$

- ΔA_c : altitude relative du lieu de la construction
 $\Delta A_c = A_c - A_m$
- $c_0(z)$: coef. d'orographie :
 - Pour $z \geq 10$ m : $c_0(z) = 1 + 0,004 \cdot \Delta A_c \cdot e^{-0,014(z-10)}$
 - Pour $z < 10$ m : $c_0(z) = c_0(10)$



07/09/2026

Calculs de structures

62

Charges de vent

[EC1 P1-4 AN § 4.2(1)P Note 2]

- Vitesse moyenne du vent :
 - $v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$
- Pression dynamique de pointe à la hauteur z : $q_p(z)$

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot l_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad \text{[EC1 P1-4 § 4.5]}$$

$$\text{avec } \begin{cases} l_v(z) = \frac{k_l}{c_0(z) \cdot \ln(\frac{z}{z_0})} \text{ pour } z_{min} \leq z \leq z_{max} \\ l_v(z) = l_v(z_{min}) \text{ pour } z \leq z_{min} \end{cases} \quad \text{[EC P1-4 § 4.4]}$$

$$\text{et } k_l : k_l = c_0(z) \cdot [1 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot (\log_{10}(z_0) + 3)^6] \quad \text{[EC1 P1-4 AN §4.4]}$$

$$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3 \quad \text{[EC1 P1-4 AN § 4.5(1) NOTE 2]}$$

Catégorie de terrain	z_0 [m]	$1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log_{10}(z_0) + 3)^6$
0	0,005	1
II	0,05	1
IIIa	0,20	0,97
IIIb	0,5	0,92
IV	1,0	0,85

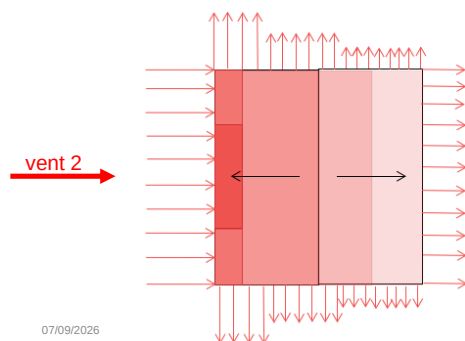
07/09/2026

Calculs de structures

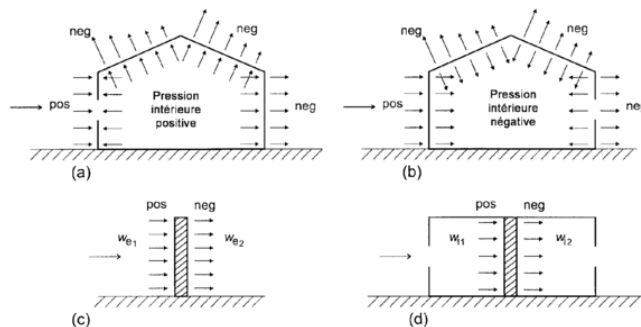
63

Charges de vent

- Vitesse moyenne du vent :
 - $v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$
- Action du vent sur la structure :
- $W(z) = q_p(z) \cdot (C_{pe} - C_{pi})$



07/09/2026



Calculs de structures

64

CALCUL DES ELEMENTS
A FROID : EUROCODE 5 P1-1

07/09/2026

Calculs de structures

65

Classes de résistance

[NF EN 14358, déc 2016]
MaJ 16/01/2024

- Classe de résistance basée sur la valeur de la contrainte caractéristique en flexion ($f_{m,k}$) en Mpa
- Contrainte caractéristique ↔ fractile 5 %
- C24
C : Bois massif résineux
24 : 95 % des échantillons dont la résistance en flexion équivaut à une contrainte supérieure à 24 MPa

Propriétés -Bois massif certifié

[NF EN 338]

Classe	Symbole	C18	C24	C30
Flexion (MPa)	$f_{m,k}$	18	24	30
Traction axiale (MPa)	$f_{t,0,k}$	10 < 11	14,5 < 14	19 < 18
Traction perpendiculaire (MPa)	$f_{t,90,k}$	0,4 < 0,5	0,4 < 0,5	0,4 < 0,6
Compression axiale (MPa)	$f_{c,0,k}$	18	21	24 < 23
Compression perpendiculaire (MPa)	$f_{c,90,k}$	2,2	2,5	2,7
Cisaillement (MPa)	$f_{v,k}$	3,4 < 2,0	4 < 2,5	4 < 3,0
Module axial 5% (GPa)	$E_{m,0,k}$	6	7,4	8,0
Module moyen axial (GPa)	$E_{0,mean}$	9	11	12
Module de cisaillement moyen (GPa)	G_{mean}	0,56	0,69	0,75
Masse volumique 5 % (kg/m³)	ρ_k	320	350	380
Masse volumique moyenne (kg/m³)	ρ_{mean}	380	420	460

• [NF EN 338, P21-353, déc. 2009] [NF EN 338, P21-353, juillet 2016]

Propriétés - Bois lamellé collé

[NF EN 14080]

Classe	Symbole	GL24h	GL24c	GL28h	GL28c
Flexion (MPa)	$f_{m,k}$	24	24	28	28
Traction axiale (MPa)	$f_{t,0,k}$	~~16,5~~ 19,2	~~14~~ 17	~~19,5~~ 22,3	~~16,5~~ 19,5
Traction perpendiculaire (MPa)	$f_{t,90,k}$	~~0,4~~ 0,5	0,35	0,45	~~0,4~~
Compression axiale (MPa)	$f_{c,0,k}$	24	~~21~~ 21,5	~~26,5~~ 28	24
Compression perpendiculaire (MPa)	$f_{c,90,k}$	~~2,7~~ 2,5	2,4	3,0	~~2,7~~
Cisaillement (MPa)	$f_{v,k}$	~~2,7~~ 3,5	2,2	3,2	~~2,7~~
Module axial 5% (GPa)	$E_{0,05}$	~~9,4~~ 9,6	~~9,4~~ 9,1	~~10,2~~ 10,5	~~10,2~~ 10,4
Module moyen axial (GPa)	$E_{0,mean}$	~~11,6~~ 11,5	~~11,6~~ 11	12,6	~~12,6~~ 12,5
Module de cisaillement 5% (GPa)	$G_{0,5}$	~~0,48~~ 0,54	~~0,39~~ 0,542	~~0,52~~ 0,54	~~0,48~~
Masse volumique 5 % (kg/m³)	ρ_k	~~380~~ 385	~~350~~ 365	~~410~~ 425	~~380~~ 390
Masse volumique moyenne (kg/m³)	ρ_{mean}	~~440~~ 420	~~420~~ 400	~~480~~ 460	~~460~~ 420

[NF EN 1194, P21-354] [NF EN 14080, P21-501] applicable depuis aout 2013.

07/09/2026

Calculs de structures

68

Coefficient de sécurité matériau

[EC5 + Annexe nationale § 2.4.1]



EC5 + AN (annexe nationale) § 2.4.1

Etats limites ultimes	γ_M
Combinaisons fondamentales : - Bois massif - Lamellé collé - LVL (=lamibois)	1,3* 1,25 1,2
Combinaisons accidentelles	1,0
* : Il paraîtrait judicieux de prendre 1,4 pour les BM non certifié (non marqué CE).	

07/09/2026

Calculs de structures

69

k_{mod}

[EC5 + Annexe nationale § 2.3.1.2]

• Classe de durée de chargement

Classe de durée de chargement	Ordre de grandeur de la durée cumulée de la charge caractéristique	Exemple de chargement
Permanent	Plus de 10 ans	Poids propre
Long terme	6 mois – 10 ans	Stockage, équipements fixes
Moyen terme	1 semaine – 6 mois	Charge d'exploitation Neige $H \geq 1000$ m
Court terme	Moins d'une semaine	Charge d'entretien Neige $H < 1000$ m
Instantané		Situation ou action accidentelle Neige exceptionnelle, Vent



[EC5 + AN (annexe nationale) § 2.3.1.2]

07/09/2026

Calculs de structures

70

k_{mod}

[EC5 + Annexe nationale § 2.3.1.3]

• Classe de service



EC5 + AN (annexe nationale) § 2.3.1.3

Classe de service	H% moyenne d'équilibre du bois	Exemples
1	$H\% \leq 12 \%$	Intérieur en milieu sec (chauffé)
2	$12\% < H\% \leq 20 \%$	Couvert, mur à ossature bois
3	$H\% > 20 \%$	



Ne pas confondre avec les classes d'emploi

07/09/2026

Calculs de structures

71

k_{mod}

[EC5 § 3.1.3]

Matériau	Classe de service	Classe de durée de chargement				
		Action permanente	Action long terme	Action moyen terme	Action court terme	Action instantanée
BM BLC LVL	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9

07/09/2026

Calculs de structures

72

k_{geo}

[EC5 § 3.2 & 3.3]

• Coefficients géométriques k_h et k_l

• Bois massif [EC5 § 3.2] :

- Flexion si $h < 150$ mm
- Traction si $l < 150$ mm

$$k_h = \min \cdot \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2} \right. \\ \left. 1,3 \right.$$

(h en mm)

• Bois lamellé collé [EC5 § 3.3]

- Flexion si $h < 600$ mm
- Traction si $l < 600$ mm

$$k_h = \min \cdot \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} \right. \\ \left. 1,1 \right.$$

(h en mm)

07/09/2026

Calculs de structures

73

[EC5 § 3.4]

 k_{geo}

- Coefficients géométriques k_h et k_ℓ

- **LVL à plis parallèles :**

- Flexion si $h \neq 300$ mm

$$k_h = \min \cdot \left\{ \left(\frac{300}{h} \right)^s \right.$$

(h en mm)

- Traction si $L \neq 3000$ mm

$$k_\ell = \min \cdot \left\{ \left(\frac{3000}{\ell} \right)^{s/2} \right.$$

(ℓ en mm)

07/09/2026

Calculs de structures

74

 k_{sys}

[EC5 § 6.6]

- Coefficient système

- **Conditions nécessaires :**

- Charge uniformément répartie sur plusieurs éléments identiques
- Système continu de distribution de charge

$$k_{\text{sys}} = 1,1$$



A limiter aux fermettes et aux solives de plancher.

07/09/2026

Calculs de structures

75

Résistance de calcul

$$R_d = \frac{k_{\text{mod}} \times R_k}{\gamma_M} \times k_{\text{géo}} \times k_{\text{sys}}$$

$\left. \begin{matrix} k_h \\ k_l \end{matrix} \right\}$

07/09/2026

Calculs de structures

76

Exemple 1

Contrainte de calcul en flexion d'une solive de 120 mm en bois C24 d'un plancher haut RdC d'habitation soumis à des charges uniformément réparties.



C24

 $f_{m,k} =$

Charge d'exploitation

 $k_{\text{mod}} =$ Classe de service :

Bois massif

 $\gamma_m =$

Solive h = 120 mm

 $k_h =$

Effet système pris en compte

 $k_{\text{sys}} =$
 $f_{m,d} = k_{\text{mod}} \times k_h \times k_{\text{sys}} \times f_{m,k} / \gamma_m =$


07/09/2026

Calculs de structures

77

ELS

- Limites de déformation, confort



07/09/2026

Calculs de structures

78

ELS

- Limites de déformation, confort



07/09/2026

Calculs de structures

79

ELS

- Limites de déformation, confort



07/09/2026

Calculs de structures

80

ELS

[EC5 § 2.2.3]

- $W_{fin,G} = W_{inst,G}(1+k_{def})$ pour une action permanente G
- $W_{fin,Q1} = W_{inst,Q1}(1+\Psi_{2,1}\cdot k_{def})$ pour l'action variable de base Q1
- $W_{fin,Qi} = W_{inst,Qi}(\Psi_{0,i}+\Psi_{2,i}\cdot k_{def})$ pour les actions variables d'accompagnement Q_i
- $W_{fin} = W_{fin,G} + W_{fin,Q1} + W_{fin,Qi}$
- $W_{inst}(Q) = W_{inst,Q1} + \sum(\Psi_{0,i} \cdot W_{inst,Qi})$
- $W_{inst,G}$: déformation instantanée sous l'action G
- $W_{inst,Q1}$: déformation instantanée sous l'action Q_1
- $W_{inst,Qi}$: déformation instantanée sous l'action Q_i
- $\Psi_{0,i}, \Psi_{2,i}$: cf. tableau des facteurs Ψ_i ci-après
- k_{def} : cf. tableau ci-après

07/09/2026

Calculs de structures

81

k_{def}

Matériau	Classe de service		
	1	2	3
Bois massif*	0,60	0,80	2,00
Lamellé-collé			
LVL			
* Pour les bois massifs posés à un taux d'humidité proche de l'humidité de saturation (> 25 %), la valeur de k_{def} doit être augmentée de 1,00.			

[EC5 § 3.1.4]

07/09/2026

Calculs de structures

83

Facteurs ψ_i

[EC0 § A1.2.2 +
Annexe nationale]

Charges d'exploitation des bâtiments	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Catégorie A : habitation, zones 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 : Commerces	0,7	0,7	0,6
Catégorie E : Stockage	1,0	0,9	0,8
Catégorie F : Zones de trafic, véhicule de poids < 30 kN	0,7	0,7	0,6
Catégorie G : Zones de trafic, véhicule de poids compris entre 30 kN et 100 kN	0,7	0,5	0,3
Catégorie H : Toits	0	0	0
Autres charges	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Charges dues à la neige sur les bâtiments (altitude > 1000 m) [EC1 P1-3 AN §4.2(1)]	0,7	0,5	0,2
Charges dues à la neige sur les bâtiments (altitude ≤1000 m) [idem ci-avant]	0,5	0,2	0
Charges dues au vent sur les bâtiments	0,6	0,2	0
Température (hors incendie)	0,6	0,5	0

07/09/2026

Calculs de structures

84

Exemple pour une solive

Combinaison d'action pour justifier la structure d'un plancher d'un local d'habitation

Charges permanentes $G = 0,3 \text{ kN/m}^2$

Charges d'exploitation $Q = 1,5 \text{ kN/m}^2$

	Etat limite	Combinaison	Combinaison	Application numérique (kN/m²)
C3	ELS (INST)	Q	Q	1,5
C4	ELS (DIF)	$G + \psi_2 \cdot Q$	$G + 0,3 Q$	0,75



ψ_2 dépend du type de charges variables

Exemple pour une panne

Combinaison d'action pour justifier les éléments de la toiture d'un bâtiment situé à une altitude $> 1000 \text{ m}$, en région A2 avec une pente de 52° .

Permanent : $G = 0,35 \text{ kN/m}^2$

Neige : $S = 0,33 \text{ kN/m}^2$

Neige accidentelle : $S_a = 0,22 \text{ kN/m}^2$

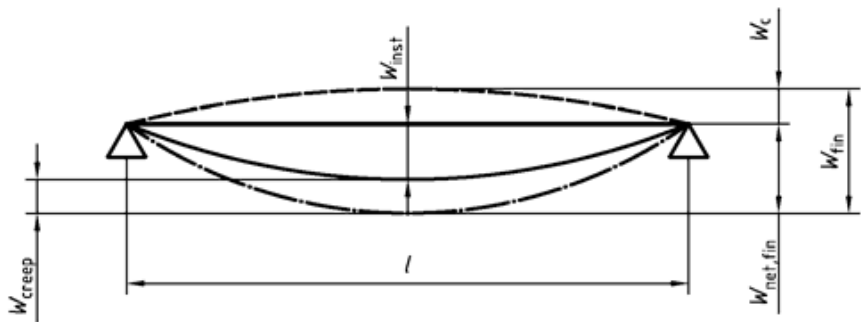
Vent pression : $W_p = 0,1 \text{ kN/m}^2$

Vent dépression : $W_d = -0,8 \text{ kN/m}^2$

	Etat limite	Combinaison	Combinaison	AN (kN/m²)
C9	ELS (INST Q)	Q	S	0,330
C10	ELS (INST Q)	$Q + \psi_0 \cdot Q$	$S + 0,6 W_p$	0,390
C11	ELS (INST Q)	$Q + \psi_0 \cdot Q$	$W_p + 0,7 S$	0,331
C12	ELS (INST Q)	Q	W_d	-0,8
C13	ELS (DIF)	$G + \psi_2 \cdot Q$	$G + 0,2 S$	0,416

Flèche

[EC5 § 7.2]



$$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c$$

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c$$

Limites de flèche

$$w_{inst}(Q) = w_{inst,Q1} + \sum(\Psi_{0,i} \cdot w_{inst,Qi})$$

EC5

	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

Consoles & porte-à-faux : Limite doublée
Panneau de plancher ou support de toiture : $w_{net,fin} < L/250$
Flèche horizontale sous efforts de vent : L/200

DTU



Les DTU des éléments supportés peuvent prescrire d'autres limites de flèche

[EC5 § 7.2 + Annexe nationale]

Variations dimensionnelles

[EC5 §5.2(2)P
AN Clause 3.2 (1)P]

- Négligeables pour une vérif CTC

Section standard à 20 % d'humidité (mm)		Section de calcul à 12 % d'humidité (mm)	
38	150	37	147
50	225	49	220
63	175	61	171
75	225	73	220
100	200	98	196

FLEXION COMPOSÉE

Flexion composée

[EC5 § 6.3.3]

- Elément soumis à de la flexion et de la compression

$$\text{Taux de travail} = \underbrace{\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}}}_{\text{Compression}} + \underbrace{\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \right)^2}_{\text{Flexion}} \leq 1$$



L'exposant 2 sur la vérification en flexion ne s'applique pas en flexion simple.

07/09/2026

Calculs de structures

91

Déversement : longueur efficace

$$l_{ef} = l \times k_{lef} + \begin{cases} 2.h \\ 0 \\ -0,5.h \end{cases}$$

Si poutre chargée sur fibre comprimée

Si poutre chargée sur fibre neutre

Si poutre chargée sur fibre tendue

Type de poutre	Type de chargement	K_{lef}
Sur appuis simples	Charge répartie constante	0,9
	Charge concentrée au milieu de la portée	0,8
Porte-à-faux	Charge répartie constante	0,5
	Charge concentrée agissant à l'extrémité libre	0,8
*** : Le rapport entre la longueur efficace l_{ef} et la portée l est valable pour une poutre dont les appuis sont limités en torsion.		

07/09/2026

Calculs de structures

92

Coefficient de déversement

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot E_{0,05} \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}}$$

Pour les bois
résineux de section
rectangulaire

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

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

07/09/2026

Calculs de structures

93

Coefficient de flambement

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

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

$$\beta_c = \begin{cases} 0,2 & \text{pour le bois massif} \\ 0,1 & \text{pour le bois lamellé collé} \end{cases}$$

07/09/2026

Calculs de structures

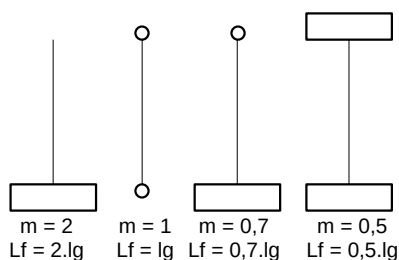
94

Elancement relatif

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

$$\lambda_z = \frac{m \cdot l_g}{\sqrt{\frac{I_{Gz}}{A}}}$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{Gz}}{A}}$$

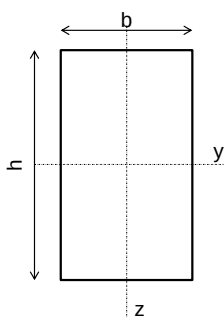


07/09/2026

Calculs de structures

95

Section rectangulaire



$$\lambda_{\max} = \lambda_z = \frac{m \cdot l_g \cdot \sqrt{12}}{b}$$

$$\lambda_{rel,\max} = \lambda_{rel,z} = \frac{m \cdot l_g \cdot \sqrt{12}}{b \cdot \pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

07/09/2026

Calculs de structures

96

Exemple 2

■ Chevron bloqué en pied

- Bois massif C24, section 50x200 mm,
- Pente 50 % soit 26,6°
- Portée 5 m rampant, Entraxe 0,50 m
- Classe de service 2 (zone non chauffée)
- Charges permanentes $G = 0,45 \text{ kN/m}^2$ (rampant)
- Charges de neige $S = 0,9 \text{ kN/m}^2$ (rampant) altitude inférieure à 1000 m

■ Combinaison ELU : $C_{\max} = 1,35 G + 1,5 S$

- Charge supportée par le chevron : $q = (1,35 \times 0,45 + 1,5 \times 0,9) \times 0,5 = 0,979 \text{ kN/m}$
- soit $q = 0,979 \text{ N/mm}$

$$\text{Taux de travail} = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \right)^2 \leq 1$$

07/09/2026

Calculs de structures

97

Vérification ELU

■ Compression

- $N =$ []
- $N =$ []
- $N =$ []

• Elancement $\lambda_z = \frac{m \cdot l_g \cdot \sqrt{12}}{b} =$ []

• L'élancement ne doit pas dépasser 120 [usages professionnels]. On met donc 2 entretoises au 1/3 et 2/3 de la longueur. l_g sera donc de $5000 / 3 = 1667 \text{ mm}$.

$$\lambda_z = \frac{m \cdot l_g \cdot \sqrt{12}}{b} =$$
 []

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

07/09/2026

Calculs de structures

98

Vérification ELU

■ Compression

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

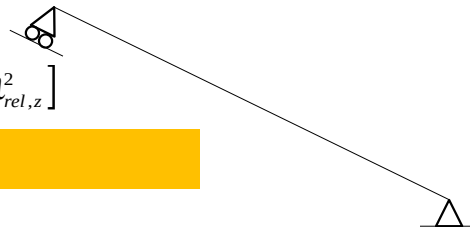
$$k_z =$$

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

$$k_{c,z} =$$

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

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



07/09/2026

Calculs de structures

99

Vérification ELU

■ Flexion

• Effort tranchant : T_z

$$T_z = q \cdot \cos 26,6^\circ =$$

$$Mf_y = \frac{T_z \cdot L^2}{8} =$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{Mf_y}{I_v} = \frac{Mf_y}{\frac{b \cdot h^3}{6}} =$$

a



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

07/09/2026

Calculs de structures

100

Vérification ELU

Flexion

• Contrainte critique

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot E_{0,05} \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} = \text{ } \text{MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \text{ } 5$$



• Si $\lambda_{rel,m} < 0,5$ $k_{crit} = \text{ }$

• Justification

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \right)^2 \leq 1$$

07/09/2026

Calculs de structures

101

Vérification ELS

Flèche instantanée ELS(INST(Q))

$$q_{inst(Q)} = S \times \cos \alpha \times \text{entraxe} = \text{ }$$

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

$$w_{inst}(Q) = \text{ } \text{mm} < L/300 = 16,7 \text{ mm}$$

Flèche nette finale

$$w_{net,fin} = w_{inst}(Q) \left(1 + \frac{k_{def} (G + \psi_2 \cdot Q) + G}{Q} \right)$$



$$w_{net,fin} = \text{ } \text{mm}$$

$$w_{net,fin} = \text{ } \text{mm} < L/200 = 25 \text{ mm}$$

07/09/2026

Calculs de structures

102

FLEXION SIMPLE COMPRESSION TRANSVERSALE CISAILLEMENT

07/09/2026

Calculs de structures

103

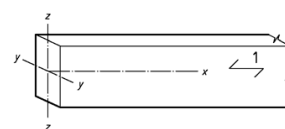
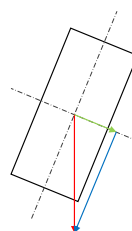
Flexion des bois déversés (2 composantes de flexion)

[EC5 § 6.1.6]

■ Critères de vérification :

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$



- $\sigma_{m,y,d}$ et $\sigma_{m,z,d}$: valeurs de calcul des contraintes de flexion selon les axes principaux tels qu'illustrés en Figure 6.1 ;
- $f_{m,y,d}$ et $f_{m,z,d}$: valeurs de calcul de résistance en flexion
- bois massif, lamellé collé, LVL
 - sections rectangulaires : $k_m = 0,7$
 - autres sections : $k_m = 1$
- autres produits structuraux à base de bois : $k_m = 1$

07/09/2026

Calculs de structures

104

Compression perpendiculaire

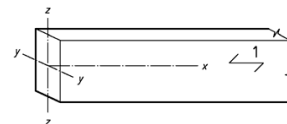
[EC5 & AN S 6.1.5]

■ Critère de vérification :

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} f_{c,90,d}$$

avec
$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}}$$

- $\sigma_{c,90,d}$: contrainte de compression de calcul
- $F_{c,90,d}$: charge en compression perpendiculaire au fil
- A_{ef} : aire de contact efficace
- $f_{c,90,d}$: résistance en compression perpendiculaire au fil de calcul
- $k_{c,90}$ est un facteur qui tient compte de la configuration de chargement, de la possibilité de fendage et du degré de déformation en compression.



07/09/2026

Calculs de structures

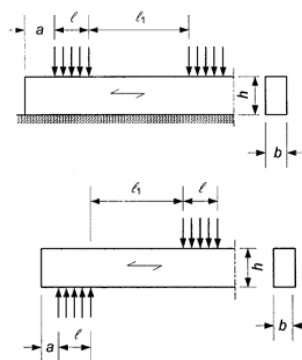
105

Compression perpendiculaire : $k_{c,90}$

[EC5 & AN S 6.1.5]

■ $A_{ef} = b \cdot l_{ef}$

- $L_{ef} = l + 30 \text{ mm}$ de chaque coté sans dépasser a , l , ou $0,5 \cdot l_1$
- Si $h > 300 \text{ mm}$
 - $k_{c,90} = 1,75$ pour BLC et LVL
 - $k_{c,90} = 1,5$ pour bois massif
- Si $h \leq 300 \text{ mm}$
 - Si appuis continus, si $l_1 \geq 2h$:
 - $k_{c,90} = 1,25$ pour le bois résineux massif
 - $k_{c,90} = 1,5$ pour le bois résineux lamellé collé
 - Si appuis discrets, si chargement réparti et/ou charge concentrée (à distance de l'appui supérieure à $l_1 = 2h$) :
 - $k_{c,90} = 1,5$ pour les bois résineux massifs
 - $k_{c,90} = 1,75$ pour les bois résineux lamellés collés, à condition que $l \leq 400 \text{ mm}$



07/09/2026

Calculs de structures

106

Cisaillement

[EC5 & AN S
6.1.7]

■ Critère : $\tau_d \leq f_{v,d}$

■ avec :

- τ_d : contrainte de calcul de cisaillement
- $f_{v,d}$: résistance de calcul au cisaillement
- $b_{ef} = k_{cr} \cdot b$
- en classe de service 1 : $k_{cr} = 0,67$ pour le bois massif, $k_{cr} = 1$ dans les autres cas,
- classe de service 2 : $k_{cr} = 0,67$ pour le bois massif > 150 mm (pour au moins 1 dimension), $k_{cr} = 0,67$ pour les BLC dont le rapport de charge $G/(G+Q) \geq 0,7$, $k_{cr} = 1$ dans les autres cas,
- en classe de service 3 : $k_{cr} = 0,67$

07/09/2026

Calculs de structures

107

Cisaillement

[EC5 §§ 6.1.7 & 6.5]
création
11/03/2024

■ Contrainte de cisaillement de calcul : τ_d

$$\tau_d = \frac{k_f \times F_{v,d}}{b_{ef} \times h_{ef}}$$

k_f : coefficient de forme de la section :

➢ 3/2 pour une section rectangulaire

➢ 4/3 pour une section ronde

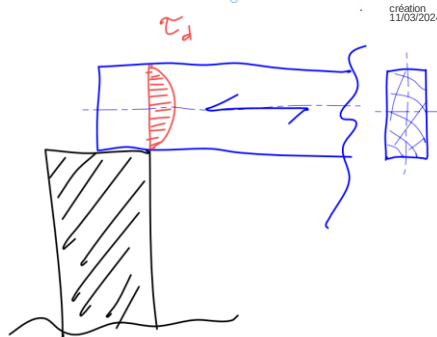
$F_{v,d}$: effort tranchant (N)

h_{ef} : hauteur réelle exposée au cisaillement (mm)

b_{ef} : épaisseur efficace de la pièce (mm) (cf. diapo précédente)



Voir aussi entailles sur appuis dans la partie assemblages



07/09/2026

Calculs de structures

108

Bibliographie

- [B1] Benoit Y., Legrand B., Tastet V. (2009).
Eurocode : Calcul des structures en bois : Guide d'application.
Clermont-Ferrand : Ed. Eyrolles.
- [B2] Racher P., Le Magorou L. (2011).
Guide Eurocode : Assemblages bois-bois et bois-métal : Dimensionnement des assemblages de type « tiges ».
Nancy : Ed. CSTB.
- [B3] Bocquet J.-F. (2005).
Assemblages bois-bois par embrèvement.
- [B4] Bénistand T. (2019).
Caractérisation des bois feuillus Français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5.
Tableau 1-II
- [B5] Blass H.J., Sandhaas, C. (2017).
Timber Engineering - Principles for design. Table B2-1
- [B6] DAGUZE D. (1992).
Conception des structures en bois lamellé collé.
Ed. Eyrolles
- [B7] Syndicat National des Constructeurs de Charpentes en Bois Lamellé-Collé (2000).
Charpentes en bois lamellé collé, Guide pratique de conception et de mise en oeuvre, 5e édition, 3e tirage
Ed. Eyrolles

07/09/2026

Calculs de structures

229

Référentiels

- [R1] NF EN 1995-1-1 (novembre 2005).
Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois
Partie 1-1 : Généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments +
Amendement A1 (octobre 2008) + Amendement A2 (juillet 2014).
- [R2] NF EN 1995-1-1/NA (mai 2010).
Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois
Partie 1-1 : Généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments
Annexe nationale à la NF EN 1995-1-1
- [R3] NF EN 1995-1-2 (septembre 2005).
Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois
Partie 1-2 : Généralités - Calcul des structures au feu.
- [R4] NF EN 1995-1-2/NA (avril 2020).
Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois
Partie 1-2 : Généralités - Calcul des structures au feu
Annexe nationale à la NF EN 1995-1-2
- [R5] NF EN 14358 (décembre 2016), Structures en bois - Détermination et vérification des valeurs caractéristiques

07/09/2026

Calculs de structures

230

ANNEXES : POINTS CRITIQUES

07/09/2026

Calculs de structures

231

Faibles pentes



07/09/2026

Calculs de structures

232

ANNEXES : DIVERS

07/09/2026

Calculs de structures

243

Humidité d'équilibre

[B4 Tableau 1-II]
[B7 § 2.2]

Variation de résistance pour 1 % de variation du taux d'humidité du bois :

$f_{c,0}$: 6 %

$f_{c,90}$: 5 %

f_m : 4 %

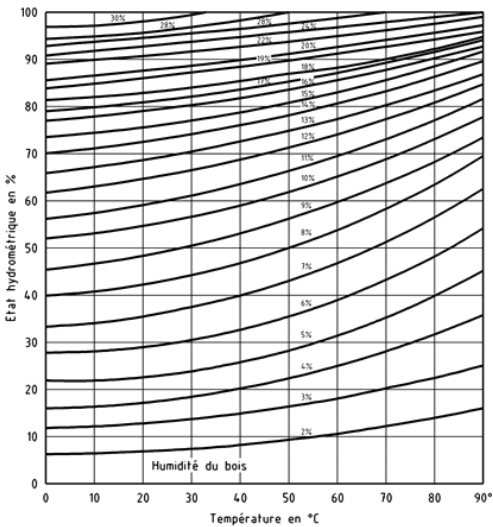
$f_{t,0}$: 2,5 %

$f_{t,90}$: 2 %

f_v : 2,5 %

$E_{m,0}$: 1,5 %

Source : [B4] & [B5]



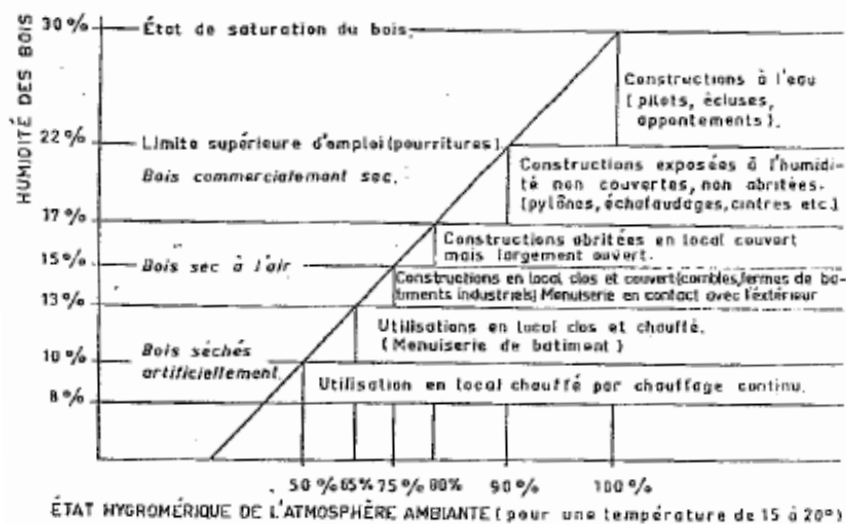
07/09/2026

Calculs de structures

244

Humidité d'équilibre

[B7 § 2.2]



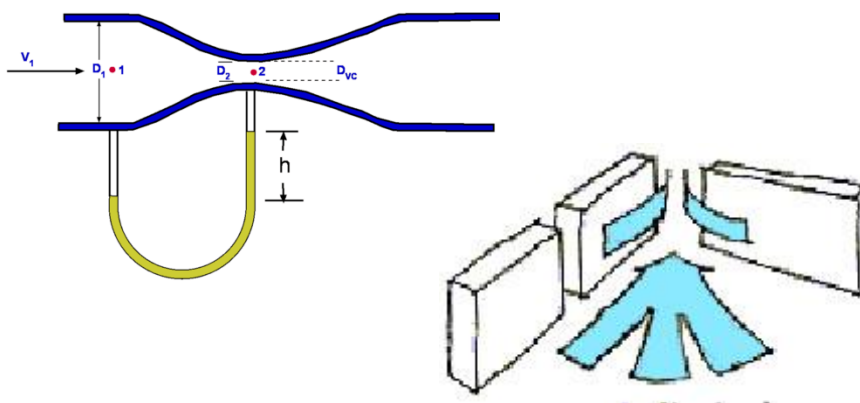
07/09/2026

Calculs de structures

245

Effets du vent

Effet de Venturi



07/09/2026

Calculs de structures

246

Effets du vent

- Effet de Karman

