

**Baccalauréat Professionnel
" OUVRAGES DU BÂTIMENT : MÉTALLERIE "**

SESSION 2015

DURÉE : 3 heures

COEFFICIENT : 2

E.2 - ÉPREUVE DE TECHNOLOGIE

Sous-épreuve E.21 - Analyse technique d'un ouvrage (U.21)

DOCUMENTS TECHNIQUES COMPLÉMENTAIRES

Ce dossier comporte 7 documents :

DTC 1 / 7 à DTC 7 / 7.

À noter : les documents sont au format A3.

Action de la neige sur les bâtiments (d'après Eurocode 1)

La charge de neige « s » est définie par la formule suivante :

$$s = \mu \times C_e \times C_t \times S_k$$

s: charge de neige en kN/m²

μ : coefficient nominal fonction de la forme de la toiture (voir tableau ci-dessous)

C_e : coefficient d'exploitation (prendre C_e = 1)

C_t : coefficient thermique (prendre C_t = 1)

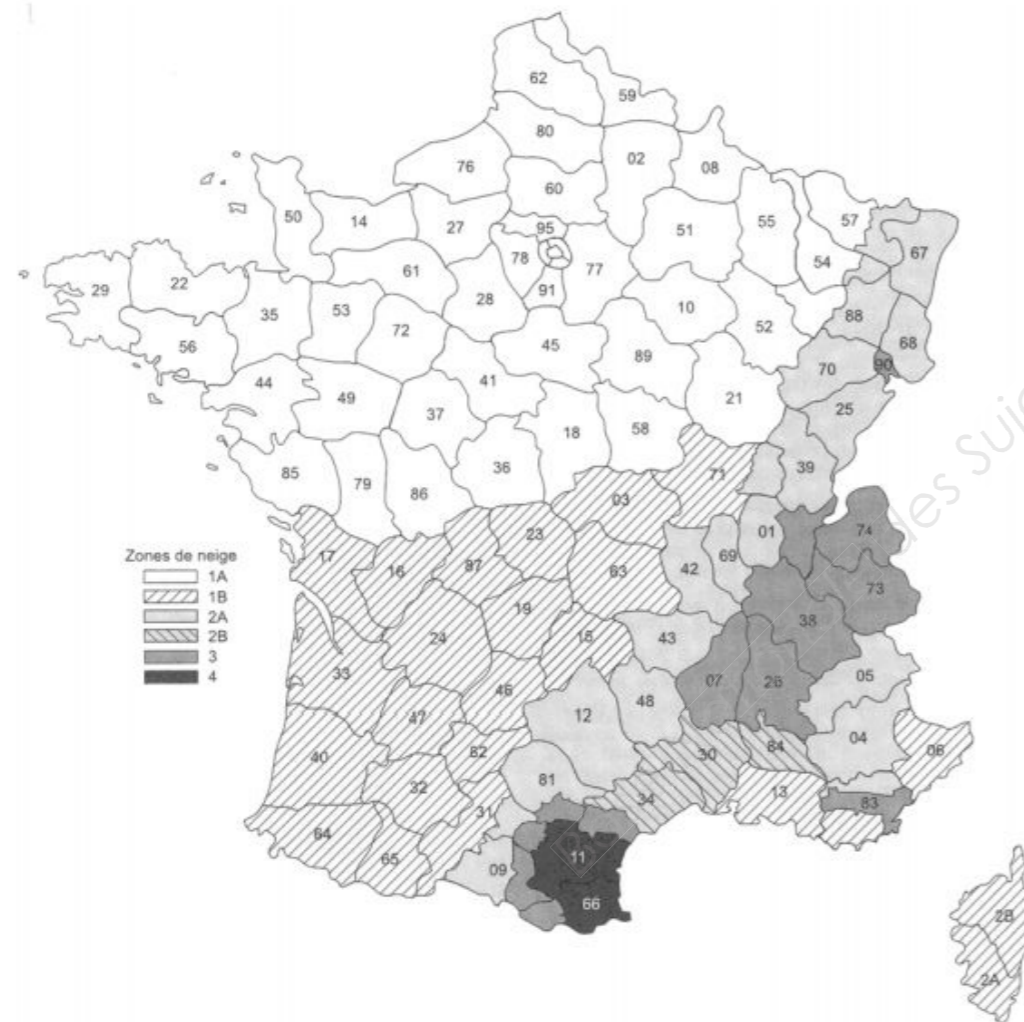
S_k : valeur de la charge de neige sur le sol (voir carte)

Coefficient de forme pour toiture

α : angle de toiture	0 à 30°	30 à 60°	Plus de 60°
μ	0,8	0,8(60 - α) / 30	0

Charge de neige sur le sol

Carte des charges de neige (Altitude < 200m)



Eurocode 1	Zones					
Unités en kN/m ²	1A	1B	2A	2B	3	4
Charge de neige sur le sol : S _k	0,45	0,45	0,55	0,55	0,65	0,90
Charge accidentelle : S _A		1,00	1,00	1,35	1,35	1,80

Formulaire pour l'étude de l'équilibre d'un solide

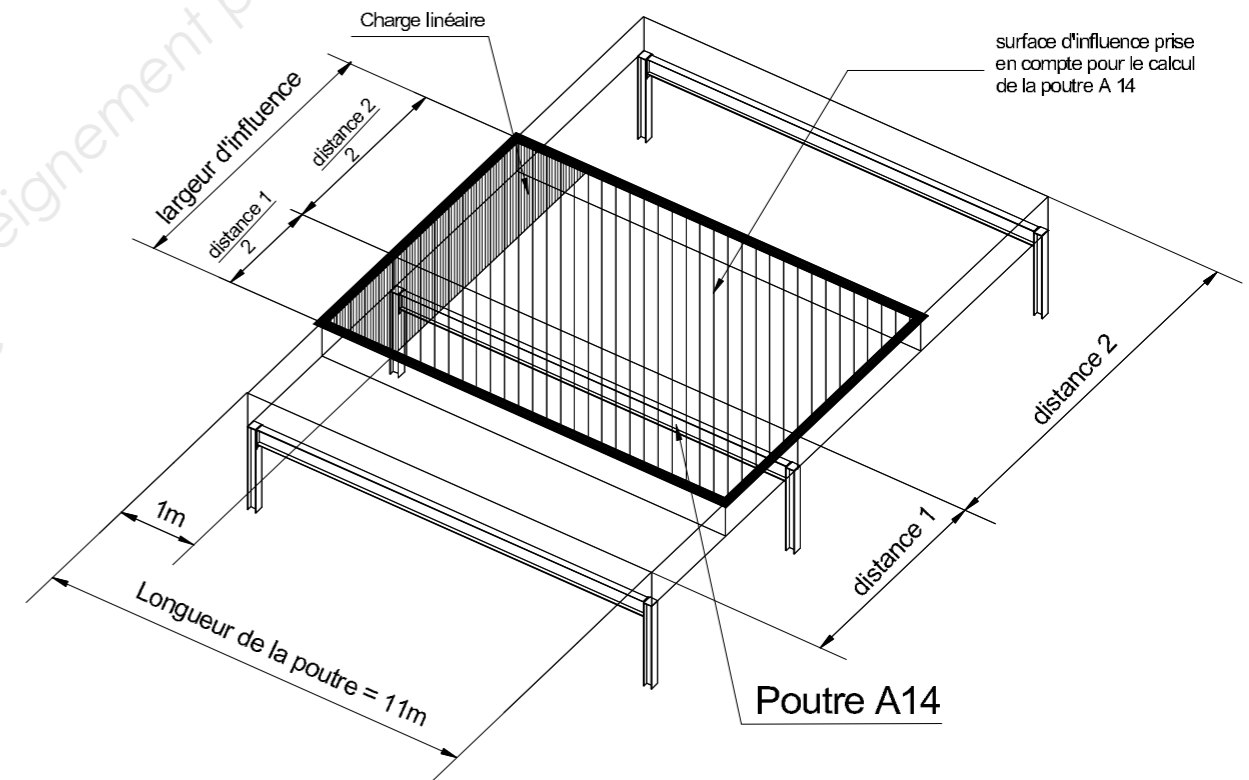
$$P = m \times g$$

P : poids en N

m : masse en kg

g : intensité de la pesanteur g = 9,81 m/s²

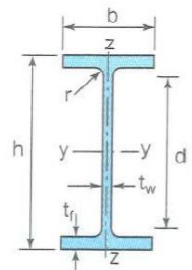
Schéma de principe pour la reprise des charges de la poutre A14

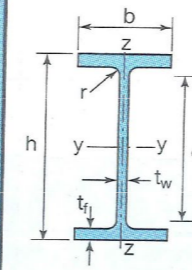


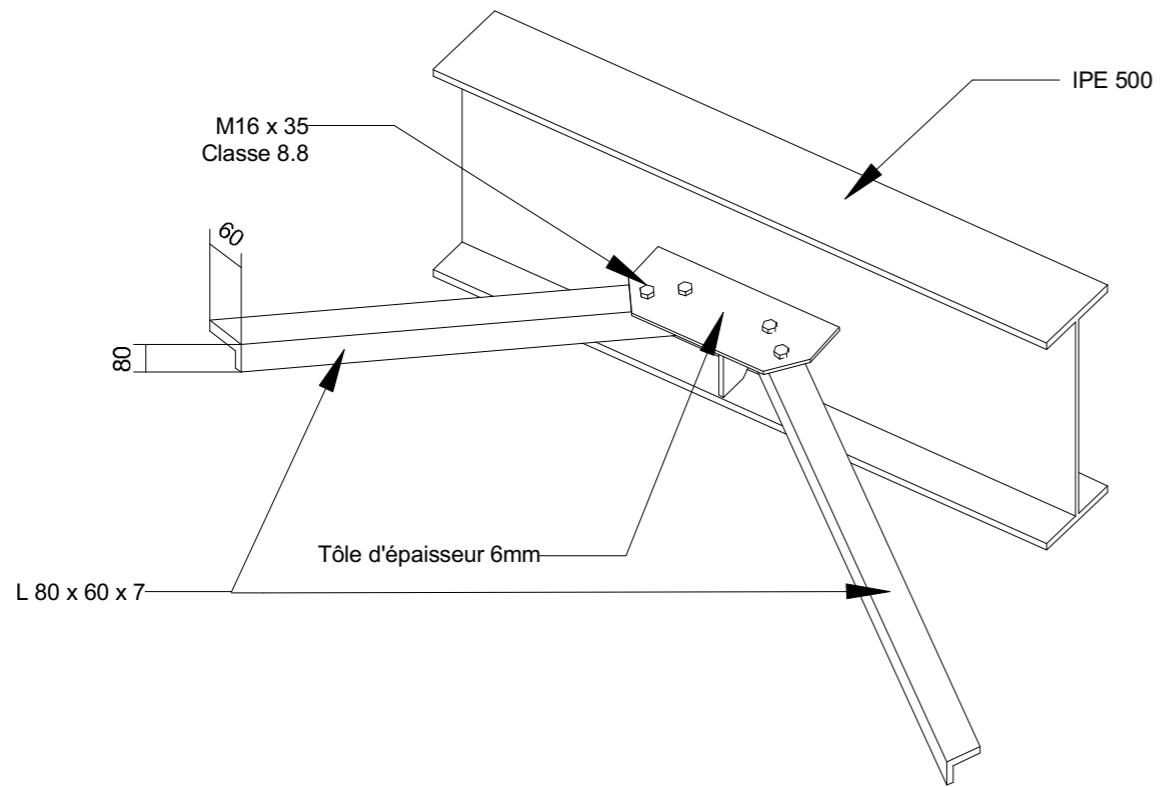
Rappel :

1 daN = 10 N

1 kN = 1000 N

Poutrelles									
MATIÈRE	Les nuances de base utilisées en construction métallique sont les aciers S 235, S 275 et S 355 d'après la norme NF EN 10025.								
	Dimensions						Masse par mètre	Aire de la section	
	h	b	a	e	r	h ₁	P	A	
	h	b	t _w	t _f	r	d	P	A	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kg/m	cm ²	
IPE 80	80,0	46	3,8	5,2	5	59,6	6,0	7,6	
IPE 100	100,0	55	4,1	5,7	7	74,6	8,1	10,3	
IPE 120	120,0	64	4,4	6,3	7	93,4	10,4	13,2	
IPE 140	140,0	73	4,7	6,9	7	112,2	12,9	16,4	
IPE 160	160,0	82	5,0	7,4	9	127,2	15,8	20,1	
IPE 180	180,0	91	5,3	8,0	9	146,0	18,8	23,9	
IPE 200	200,0	100	5,6	8,5	12	159,0	22,4	28,5	
IPE 220	220,0	110	5,9	9,2	12	177,6	26,2	33,4	
IPE 240	240,0	120	6,2	9,8	15	190,4	30,7	39,1	
IPE 270	270,0	135	6,6	10,2	15	219,6	36,1	45,9	
IPE 300	300,0	150	7,1	10,7	15	248,6	42,2	53,8	
IPE 330	330,0	160	7,5	11,5	18	271,0	49,1	62,6	
IPE 360	360,0	170	8,0	12,7	18	298,6	57,1	72,7	
IPE 400	400	180	8,6	13,5	21	331,0	66,3	84,5	
IPE 450	450,0	190	9,4	14,6	21	378,8	77,6	98,8	
IPE 500	500,0	200	10,2	16,0	21	426,0	90,7	115,5	
IPE 550	550,0	210	11,1	17,2	24	467,6	105,5	134,4	
IPE 600	600,0	220	12,0	19,0	24	514,0	122,4	156,0	

Produits sidérurgiques – formes, dimensions, caractéristiques											
NORMES DE RÉFÉRENCE	Dimensions : NF A 45-205 Tolérances : NF EN 10034										
		Caractéristiques de calcul									
I _x		I _x /V _x	i _x	-	-	I _y	I _y /V _y	i _y	-	-	J
I _y		W _{el,y}	i _y	W _{pl,y}	A _{Vz}	I _z	W _{el,z}	i _z	W _{pl,z}	A _{Vy}	I _t
	cm ⁴	cm ³	cm	cm ³	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	cm ³	cm ²	cm ⁴
IPE 80	80,1	20,0	3,24	23,2	3,6	8,48	3,69	1,05	5,8	5,1	0,70
IPE 100	171,0	34,2	4,07	39,4	5,1	15,91	5,78	1,24	9,1	6,7	1,20
IPE 120	317,8	53,0	4,90	60,7	6,3	27,65	8,64	1,45	13,6	8,6	1,74
IPE 140	541,2	77,3	5,74	86,3	7,6	44,90	12,30	1,65	19,2	10,6	2,45
IPE 160	869,3	108,7	6,58	123,9	9,7	68,28	16,65	1,84	26,1	12,8	3,60
IPE 180	1317,0	146,3	7,42	166,4	11,3	100,81	22,16	2,05	34,6	15,3	4,79
IPE 200	1943,2	194,3	8,26	220,6	14,0	142,31	28,46	2,24	44,6	18,0	6,98
IPE 220	2771,8	252,0	9,11	285,4	15,9	204,81	37,24	2,48	58,1	21,3	9,07
IPE 240	3891,6	324,3	9,97	366,6	19,1	283,58	47,26	2,69	73,9	24,8	12,88
IPE 270	5789,8	428,9	11,23	484,0	22,1	419,77	62,19	3,02	97,0	29,0	15,94
IPE 300	8356,1	557,1	12,46	628,4	25,7	603,62	80,48	3,35	125,2	33,7	20,12
IPE 330	11766,9	713,1	13,71	804,3	30,8	788,00	98,50	3,55	153,7	38,7	28,15
IPE 360	16265,6	903,6	14,95	1019,1	35,1	1043,20	122,73	3,79	191,1	45,3	37,32
IPE 400	23128,4	1156,4	16,55	1307,1	42,7	1317,58	146,40	3,95	229,0	51,1	51,08
IPE 450	33742,9	1499,7	18,48	1701,8	50,8	1675,35	176,35	4,12	276,4	58,3	66,87
IPE 500	48198,5	1927,9	20,43	2194,1	59,9	2140,90	214,09	4,30	335,9	67,2	89,29
IPE 550	67116,5	2440,6	22,35	2787,0	72,3	2666,49	253,95	4,45	400,5	76,1	123,24
IPE 600	92083,5	3069,4	24,30	3512,4	83,8	3385,78	307,80	4,66	485,6	87,9	165,12



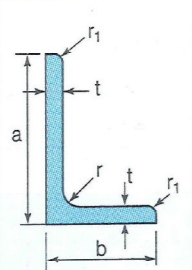
Cas de charges

	Cas de charge	Effort tranchant	Moment de flexion	Observation
Cas n°1	<p> $R_A = \frac{3}{8} q \cdot L$ $R_B = \frac{5}{8} q \cdot L$ Charge uniformément répartie Appui simple en A, encastrement en B </p>	<p> $V(x) = -(R_A - qx)$ $V_A = -R_A$ $V_B = R_B$ </p>	<p> $M_A = 0$ $M_B = -\frac{qL^2}{8}$ $M_0 = \frac{9}{128} qL^2$ pour $x_0 = \frac{3L}{8}$ </p>	$V = 0$ pour $x_0 = \frac{3L}{8}$ $M = 0$ pour $x_0 = \frac{3L}{4}$
Cas n°2	<p> $R_A = \frac{qL}{2}$ $R_B = \frac{qL}{2}$ Charge uniformément répartie Appui simple en A et B </p>	<p> $V_A = -\frac{qL}{2}$ $V_B = \frac{qL}{2}$ $V(x) = \frac{q \cdot L}{2} - q \cdot x$ </p>	<p> $M_0 = \frac{q \cdot L^2}{8}$ pour $x_0 = \frac{L}{2}$ $M(x) = \frac{q \cdot x}{2} (L - x)$ </p>	Flèche $f = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{EI}$ pour $x = \frac{L}{2}$
Cas n°3	<p> $R_A = \frac{P \cdot b}{L}$ $R_B = \frac{P \cdot a}{L}$ Charge concentrée P Appui simple en A et B </p>	<p> $V_{AC} = -R_A$ $V_{CB} = R_B$ </p>	<p> $M_0 = \frac{P \cdot a \cdot b}{L}$ pour $x_0 = a$ </p>	Si $a = b = \frac{L}{2}$ $R_A = \frac{P}{2}$ $M_0 = \frac{P \cdot L}{4}$ $f = \frac{P \cdot L^3}{48EI}$

D'après documents OTUA

Trusquinage									
REMARQUE PRÉLIMINAIRE	Les indications données ne constituent qu'une première approche. Elles doivent être adaptées cas par cas en fonction des dimensions normalisées des boulons et du respect des règles en vigueur.								
	Dimensions			Diamètre des boulons		Trusquinage			
	a	b	t	Φ_a	Φ_b	δ	δ_1	δ_2	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
	L 30 x 20 x 3	30	20	3	8		17		
	L x 35 x 20 x 3,5	35	20	3,5	10		20		
	L 40 x 25 x 4	40	25	4	12		22		
	L 45 x 30 x 4	45	30	4	12	8	27		17
	L 45 x 30 x 5	45	30	5	12	8	27		17
	L 50 x 30 x 5	50	30	5	14	8	28		17
	L 60 x 40 x 5	60	40	5	14	12	35		22
	L 60 x 40 x 6	60	40	6	16	12	35		22
L 70 x 50 x 6	70	50	6	16	14	40		23	
L 80 x 60 x 7	80	60	7	18	16	45		35	
L 80 x 60 x 8	80	60	8	20	16	45		35	

D'après documents OTUA

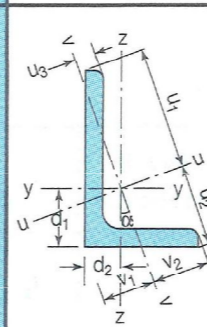
Laminés marchands usuels													
MATIÈRE	Les nuances de base utilisées en construction métallique sont les aciers S 235, S 275 et S 355 d'après la norme NF EN 10025.												
	Dimensions					Masse par mètre	Aire de la section	Distance du centre de gravité					
	a	b	e	r	r ₁	P	A	d ₁	d ₂	z ₁	v ₂	tan α	
	a	b	t	r	r ₁	P	A	d ₁	d ₂	u ₁	v ₂	tan α	
	mm	mm	mm	mm	mm	kg/m	cm ²	cm	cm	cm	cm	-	
L 80 x 40 x 6	80	40	6	6	3	5,40	6,88	2,86	0,89	5,19	2,38	0,261	
L 80 x 40 x 8	80	40	8	8	4	7,09	9,03	2,93	0,96	5,15	2,34	0,252	
L 80 x 60 x 7	80	60	7	8	4	7,36	9,38	2,51	1,52	5,55	2,91	0,550	
L 80 x 60 x 8	80	60	8	8	4	8,34	10,63	2,55	1,56	5,53	2,91	0,547	
L 80 x 65 x 6	80	65	6	6	3	6,58	8,38	2,41	1,66	5,60	2,96	0,650	
L 80 x 65 x 8	80	65	8	8	4	8,66	11,03	2,47	1,73	5,58	2,95	0,644	
L 80 x 65 x 10	80	65	10	10	5	10,68	13,61	2,54	1,80	5,57	2,94	0,639	
L 90 x 65 x 6	90	65	6	6	3	7,05	8,98	2,81	1,57	6,22	3,26	0,516	
L 90 x 65 x 8	90	65	8	8	4	9,29	11,83	2,88	1,64	6,20	3,25	0,510	
L 90 x 70 x 8	90	70	8	8	4	9,60	12,23	2,80	1,81	6,26	3,31	0,592	
L 100 x 50 x 6	100	50	6	6	3	6,81	8,68	3,53	1,05	6,52	2,99	0,266	
L 100 x 50 x 8	100	50	8	8	4	8,97	11,43	3,60	1,13	6,48	2,96	0,259	
L 100 x 50 x 10	100	50	10	10	5	11,07	14,11	3,66	1,20	6,44	2,93	0,252	
L 120 x 80 x 8	120	80	8	11	5,5	12,16	15,49	3,83	1,87	8,23	4,21	0,441	
L 120 x 80 x 10	120	80	10	11	5,5	15,02	19,13	3,92	1,95	8,18	4,20	0,438	
L 130 x 65 x 8	130	65	8	11	5,5	11,85	15,09	4,56	1,37	8,51	3,89	0,263	
L 130 x 65 x 10	130	65	10	11	5,5	14,62	18,63	4,65	1,45	8,44	3,85	0,259	
L 150 x 90 x 10	150	90	10	12	6	18,18	23,15	5,00	2,04	10,10	5,01	0,363	
L 150 x 90 x 11	150	90	11	12	6	19,90	25,34	5,04	2,08	10,07	5,00	0,362	
L 150 x 100 x 10	150	100	10	13	6,5	18,98	24,18	4,80	2,34	10,28	5,27	0,442	
L 150 x 100 x 12	150	100	12	13	6,5	22,56	28,74	4,89	2,42	10,23	5,26	0,439	
L 160 x 80 x 10	160	80	10	13	6,5	18,20	23,18	5,63	1,69	10,46	4,78	0,263	
L 160 x 80 x 12	160	80	12	13	6,5	21,62	27,54	5,72	1,77	10,40	4,75	0,260	
L 200 x 100 x 10	200	100	10	15	7,5	22,95	29,24	6,93	2,01	13,15	6,02	0,266	
L 200 x 100 x 12	200	100	12	15	7,5	27,32	34,80	7,03	2,10	13,08	5,99	0,264	
L 200 x 100 x 14	200	100	14	15	7,5	31,62	40,28	7,12	2,18	13,01	5,95	0,262	

64

Produits sidérurgiques - formes, dimensions, caractéristiques

NORMES DE RÉFÉRENCE

Dimensions : NF A 45-010
Tolérances : NF A 45-009-2



Caractéristiques de calcul

Axe yy		Axe zz			Axe uu		Axe vv		
I _x	I _x / d _x	i _x	I _y	I _y / d _y	i _y	I _u	i _u	I _v	i _v
I _y	W _{el,y}	i _y	I _z	W _{el,z}	i _z	I _u	i _u	I _v	i _v
cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm	cm ⁴	cm

CORNIÈRES À AILES INÉGALES (suite)

L 80 x 40 x 6	45,02	8,77	2,56	7,66	2,46	1,06	47,74	2,63	4,94	0,85
L 80 x 40 x 8	57,49	11,34	2,52	9,54	3,14	1,03	60,73	2,59	6,30	0,84
L 80 x 60 x 7	59,00	10,74	2,51	28,37	6,34	1,74	72,26	2,78	15,12	1,27
L 80 x 60 x 8	66,28	12,16	2,50	31,79	7,16	1,73	81,00	2,76	17,06	1,27
L 80 x 65 x 6	53,16	9,50	2,52	31,54	6,52	1,94	68,97	2,87	15,73	1,37
L 80 x 65 x 8	68,08	12,32	2,48	40,11	8,41	1,91	87,95	2,82	20,24	1,35
L 80 x 65 x 10	81,76	14,97	2,45	47,87	10,19	1,88	105,11	2,78	24,52	1,34
L 90 x 65 x 6	73,79	11,92	2,87	32,60	6,61	1,91	88,75	3,14	17,64	1,40
L 90 x 65 x 8	94,87	15,49	2,83	41,48	8,54	1,87	113,65	3,10	22,69	1,39
L 90 x 70 x 8	97,27	15,68	2,82	51,42	9,90	2,05	121,97	3,16	26,71	1,48
L 100 x 50 x 6	90,23	13,95	3,22	15,61	3,96	1,34	95,89	3,32	9,95	1,07
L 100 x 50 x 8	116,22	18,15	3,19	19,66	5,08	1,31	123,16	3,28	12,73	1,06
L 100 x 50 x 10	140,35	22,15	3,15	23,30	6,13	1,29	148,28	3,24	15,37	1,04
L 120 x 80 x 8	225,65	27,63	3,82	80,76	13,17	2,28	260,65	4,10	45,76	1,72
L 120 x 80 x 10	275,53	34,10	3,80	98,11	16,21	2,26	317,53	4,07	56,11	1,71
L 130 x 65 x 8	262,51	31,10	4,17	44,77	8,72	1,72	278,67	4,30	28,61	1,38
L 130 x 65 x 10	320,46	38,39	4,15	54,20	10,73	1,71	339,65	4,27	35,01	1,37
L 150 x 90 x 10	533,14	53,29	4,80	146,07	20,98	2,51	592,07	5,06	87,15	1,94
L 150 x 90 x 11	580,73	58,30	4,79	158,65	22,91	2,50	644,37	5,04	95,02	1,94
L 150 x 100 x 10	551,67	54,08	4,78	197,75	25,80	2,86	637,36	5,13	112,06	2,15
L 150 x 100 x 12	649,61	64,23	4,75	231,87	30,58	2,84	749,12	5,11	132,35	2,15
L 160 x 80 x 10	611,31	58,94	5,14	104,41	16,55	2,12	648,97	5,29	66,75	1,70
L 160 x 80 x 12	719,52	69,98	5,11	122,03	19,59	2,10	762,86	5,26	78,69	1,69
L 200 x 100 x 10	1218,58	93,24	6,46	210,34	26,33	2,68	1295,51	6,66	133,41	2,14
L 200 x 100 x 12	1440,06	111,01	6,43	247,22	31,28	2,67	1529,57	6,63	157,71	2,13

**Pinces longitudinales et transversales
Entraxes minimum et maximum**

Tableau 3.3 - Pinces longitudinales et transversales, entraxes minimum et maximum

Distances et entraxes	Minimum	Maximum ^{1) 2) 3)}	
		Structures réalisées en aciers conformes à l'EN 10025 à l'exception des aciers conformes à l'EN 10025-5	
voir Figure 3.1		Acier exposé aux intempéries ou autres influences corrosives	Acier non exposé aux intempéries ou autres influences corrosives
		Pince longitudinale e ₁	1,2d ₀
Pince transversale e ₂	1,2d ₀	4t + 40 mm	
Distance e ₃ pour les trous oblongs	1,5d ₀ ⁴⁾		
Distance e ₄ pour les trous oblongs	1,5d ₀ ⁴⁾		
Entraxe p ₁	2,2d ₀	Minimum de : 14t ou 200 mm	Minimum de : 14t ou 200 mm
Entraxe p _{1,0}		Minimum de : 14t ou 200 mm	
Entraxe p _{1,i}		Minimum de : 28t ou 400 mm	
Entraxe p ₂ ⁵⁾	2,4 d ₀	Minimum de : 14t ou 200 mm	Minimum de : 14t ou 200 mm

¹⁾ Il n'y a pas de valeurs maximales d'entraxe, de pince longitudinale et transversale, sauf dans les cas suivants :

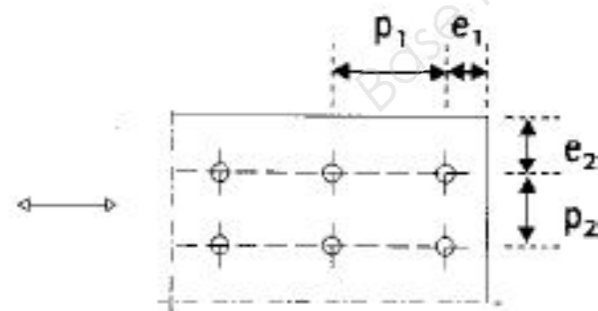
- pour les barres comprimées afin d'éviter le voilement local et prévenir la corrosion dans les barres exposées et ;
- pour les barres tendues exposées afin de prévenir la corrosion.

²⁾ Il convient de calculer la résistance au voilement local de la plaque comprimée entre les fixations conformément à l'EN 1993-1-1 en utilisant 0,6p₁ comme longueur de flambement. Il est inutile de vérifier le voilement local entre les fixations si p₁/t est inférieur à 98. Il convient que la pince transversale n'excède pas les exigences concernant le voilement local pour un élément en console dans les barres comprimées, voir l'EN 1993-1-1. La pince longitudinale n'est pas affectée par cette exigence.

³⁾ t est l'épaisseur de la pièce attachée extérieure la plus mince.

⁴⁾ Les limites dimensionnelles des trous oblongs sont données en 2.8, normes de référence : Groupe 7

⁵⁾ Pour les rangées de fixations en quinconce, un écartement minimum entre rangées p₂ = 1,2d₀ peut être utilisé, à condition que la distance minimum, L, entre deux fixations quelconques soit supérieure ou égale à 2,4d₀, (voir figure 3.1b).



a: symboles pour les entraxes des fixations

Vérification de la flexion aux L'ELU

Il convient que :
$$\frac{M_{Ed}}{M_{C,Rd}} \leq 1$$

La valeur de M_{C,Rd} est donnée :
$$M_{C,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{ely} \times f_y}{\gamma_{M0}}$$

- avec
- M_{Ed} = valeur de calcul du moment fléchissant ;
 - M_{C,Rd} = valeur de calcul de la résistance à la flexion ;
 - W_{ely} = module d'inertie de flexion ;
 - f_y = limite d'élasticité de l'acier = 235 N/mm² ;
 - γ_{M0} = coefficient partiel pour la résistance des sections transversales ;
- γ_{M0} = 1 pour les bâtiments.

Conversion :

1 N.m = 10 daN.cm ;
1N/mm² = 10 daN/cm².

Capacité du boulon

On doit vérifier que : $F_{v,Ed} < F_{v,Rd}$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \times f_{ub} \times A}{\gamma_{M2}}$$

La valeur de $F_{v,Ed}$ est donnée :

- avec $A = A_s$ l'aire de la résistance en traction du boulon en mm^2 ;
 f_{ub} = valeur ultime à la traction en N/mm^2 ;
 γ_{M2} = coefficient partiel pour résistance à la rupture des sections transversales en traction,
 $\gamma_{M2} = 1,25$ pour les bâtiments ;
 $\alpha_v = 0,6$ pour les classes 4,6, 5,6 et 8,8 ;
 $\alpha_v = 0,5$ pour les classes 4,8, 5,8, 6,8 et 10,9.

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES

Désignation	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24
d (mm)	8	10	12	14	16	18	20	22	24
d ₀ (mm)	9	11	13	15	18	20	22	24	26
A (mm ²)	50,3	78,5	113	154	201	254	314	380	452
A _s (mm ²)	36,6	58	84,3	115	157	192	245	303	353
∅ rondelle (mm)	16	20	24	27	30	34	36	40	44
∅ clé (mm)	21	27	31	51	51	51	58	58	58
d _m (mm)	14	18,3	20,5	23,7	24,58	29,1	32,4	34,5	38,8

d : diamètre de la partie non filetée de la vis
d₀ : diamètre nominal du trou
A : section nominale du boulon
A_s : section résistante de la partie filetée
d_m : diamètre moyen entre le cercle circonscrit et le cercle inscrit à la tête du boulon
Nota : en italique, les boulons moins usuels.

VALEURS NOMINALES DE LIMITE D'ÉLASTICITÉ f_{yb} ET DE RÉSISTANCE ULTIME À LA TRACTION f_{ub} POUR LES BOULONS

Classe de boulon	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

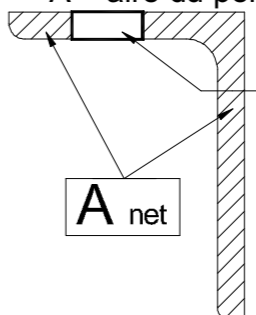
Capacité de la cornière

On doit vérifier que : $\frac{N_{Ed}}{N_{E,Rd}} \leq 1$

La valeur de N_{Ed} est donnée.

Le $N_{t,Rd}$ est la valeur de calcul de la résistance à la traction prise comme **la plus petite des valeurs** entre : $N_{pl,Rd}$ ou $N_{u,Rd}$.

Les 2 résistances se calculent de la manière suivante :

Formules	Conditions
$N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}}$	A = aire de la section brute de la cornière en mm^2 ; F_y = limite élastique de l'acier en $\text{N/mm}^2 = 235 \text{ N/mm}^2$; γ_{M0} = coefficient partiel pour la résistance des sections transversales ; $\gamma_{M0} = 1$ pour les bâtiments.
$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{M2}}$	A_{net} = aire de la section transversale nette en mm^2 , = A – aire du perçage ;  f_u = résistance à la traction de l'acier en $\text{N/mm}^2 = 360 \text{ N/mm}^2$; γ_{M2} = coefficient pour la résistance à la rupture des sections transversales en traction ; $\gamma_{M2} = 1,25$ pour les bâtiments.

Diamètre des trous

Quel que soit le type de boulon, le jeu normal entre la tige du boulon et le trou des pièces à assembler, est le suivant :

$$\begin{aligned} d \leq 14 & \quad d_0 = d + 1 \text{ mm} ; \\ d \leq 24 & \quad d_0 = d + 2 \text{ mm} ; \\ d \leq 27 & \quad d_0 = d + 3 \text{ mm} . \end{aligned}$$