

1 Exemple 1 : assemblage bois/bois travaillant en double cisaillement – Cas de l'arbalétrier et de l'entrait moisé



Figure 3.1 Exemple d'un assemblage d'un arbalétrier et d'un entrait moisé avec des boulons (© Cosylva).

1.1 Hypothèses de calcul

Considérons une ferme d'une maison à ossature bois (figure 3.2) avec une couverture en tuile mécanique. Elle supporte des charges de structure (G) et de neige (S). La construction est située à une altitude inférieure à 1 000 m. Une étude a permis de déterminer les efforts dans les barres. L'arbalétrier apporte à l'assemblage un effort de 108 kN (figure 3.3) avec la combinaison $1,35G + 1,5S$. La structure est en bois lamellé-collé classé GL24h (tableau 3.2). L'entrait est moisé de section 100×270 mm et la section de l'arbalétrier est de 100×250 mm (figure 3.4). L'assemblage est réalisé avec des boulons de 16 mm de diamètre en acier classé 6.8.

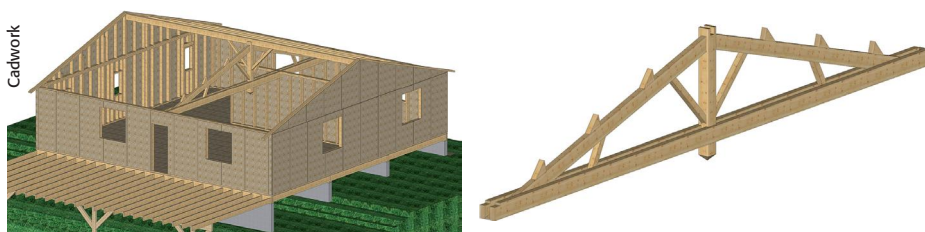


Figure 3.2 Ferme étudiée.

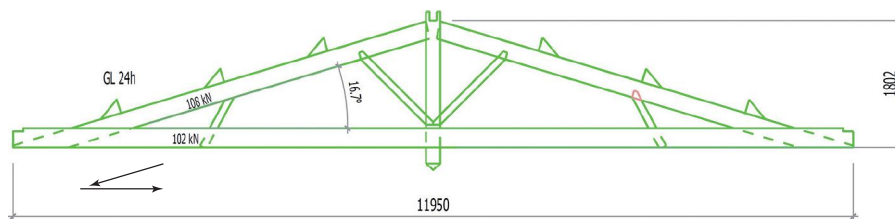


Figure 3.3 Plan de la ferme.

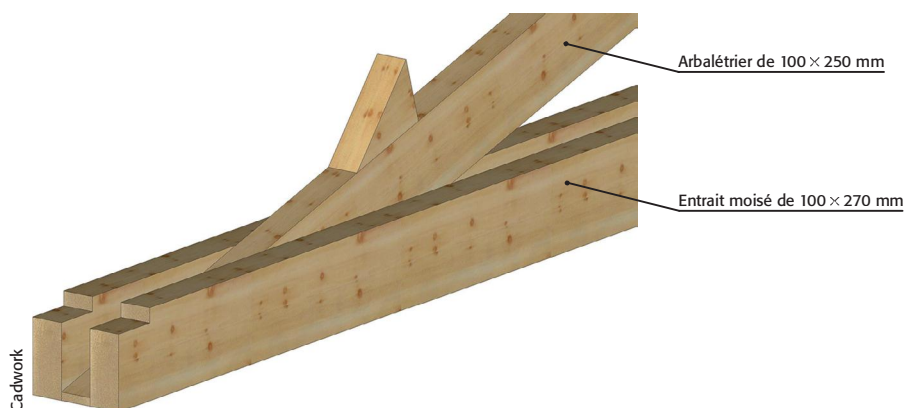


Figure 3.4 Assemblage entre l'entrait et l'arbalétrier.

1.2 Détermination de la résistance des boulons de l'assemblage

Le calcul de la résistance des boulons de l'assemblage consiste à définir la résistance d'un boulon isolé, puis de positionner les boulons dans l'assemblage afin de déterminer la résistance de l'ensemble des boulons.

1.2.1 Calcul de la résistance d'une tige isolée (ou un boulon)

Le calcul de la résistance des boulons s'applique si leur diamètre est compris entre 10 et 30 mm. La première étape consiste à calculer la portance locale dans l'arbalétrier, dans l'entrait, puis le moment d'écoulement plastique. Ces éléments permettront de définir la résistance du boulon en fonction du mode de rupture pour sélectionner le plus faible. Il est possible d'ajouter l'effet de corde lorsque, dans le mode de rupture, le boulon se déforme. Attention, les résultats des équations de l'Eurocode 5 fournissent la résistance d'un plan de cisaillement. L'assemblage travaillant en double cisaillement, il est nécessaire de doubler les valeurs.

1.2.1.1 Portance locale dans l'arbalétrier et dans l'entrait moisé

Le tableau 3.1 indique les formules de calcul de la portance locale lorsque l'angle entre la force et le fil du bois est nul, en fonction du matériau.

Lorsque l'effort a un angle α par rapport au fil du bois, la valeur caractéristique de la portance locale devient :

$$f_{b,\alpha,k} = \frac{f_{b,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad \text{équation 8.31 de l'Eurocode 5}$$

avec :

- $f_{b,0,k}$: portance locale caractéristique du boulon lorsque l'angle entre le fil du bois et l'effort est nul, en N/mm^2 ;
- α : angle de l'effort avec le fil du bois, en degrés ;
- $k_{90} = 1,35 + 0,015d$ pour les résineux ;
- $k_{90} = 1,30 + 0,015d$ pour le lamibois (LVL) ;
- $k_{90} = 0,90 + 0,015d$ pour les feuillus.

Tableau 3.1 Calcul de la portance locale, en N/mm².

Matériaux	Portance locale
Bois massif, bois lamellé-collé et LVL	$f_{b,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k$ équation 8.32 de l'Eurocode 5
Contreplaqué	$f_{b,k} = 0,11(1 - 0,01d)\rho_k$ équation 8.36 de l'Eurocode 5
Panneaux de particules et OSB	$f_{b,k} = 50d^{-0,6} \cdot t^{0,2}$ équation 8.37 de l'Eurocode 5
avec :	
– $f_{b,0,k}$: portance locale caractéristique du boulon lorsque l'angle entre le fil du bois et l'effort est nul, en N/mm ² ;	
– d : diamètre du boulon, en mm ;	
– ρ_k : masse volumique caractéristique du bois, en kg/m ³ ;	
– t : épaisseur des panneaux, en mm.	

Remarque: ce calcul ne concerne pas les panneaux dérivés du bois, la notion de « fil du bois » étant complètement différente ou sans objet.

Pour notre exemple :

- Dans l'arbalétrier (t_2) :

$$f_{b,2,k} = f_{b,0,k} = 0,082 \times (1 - 0,01 \times 16) \times 385 = 26,5 \text{ N/mm}^2$$

- Dans l'entrait (t_1) :

$$f_{b,1,k} = \frac{26,5}{1,59 \times \sin^2 16,7 + \cos^2 16,7} = 25,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{avec } k_{90} = 1,35 + 0,015 \times 16 = 1,59.$$

Le ratio des portances locales est :

$$\beta = \frac{f_{b,2,k}}{f_{b,1,k}} = \frac{26,5}{25,3} = 1,05$$

La figure 3.5 définit t_1 et t_2 , l'entrait moisé et l'arbalétrier pour notre exemple.

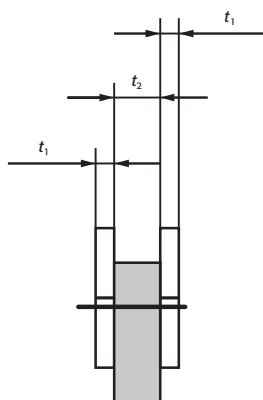


Figure 3.5 Définition de t_1 et de t_2 . Pour notre exemple, t_1 représente l'entrait moisé et t_2 l'arbalétrier.

Tableau 3.2 Valeurs caractéristiques des bois lamellés (source: NF EN 1194).

Symbole	Désignation	Unité	Classe de résistance du bois lamellé-collé						
			GL20h	GL22h	GL24h	GL26h	GL28h	GL30h	GL32h
$f_{m,g,k}$	Résistance à la flexion	N/mm ²	20	22	24	26	28	30	32
$f_{t,0,g,k}$	Résistance à la traction		16	17,6	19,2	20,8	22,4	24	25,6
$f_{t,90,g,k}$			0,5						
$f_{c,0,g,k}$	Résistance à la compression		20	22	24	26	28	30	32
$f_{c,90,g,k}$			2,5						
$f_{vg,k}$	Résistance au cisaillement (cisaillement et torsion)		3,5						
$E_{0,g,moyen}$	Module d'élasticité		8 400	10 500	11 500	12 100	12 600	13 600	14 200
$E_{0,g,05}$			7 000	8 800	9 600	10 100	10 500	11 300	11 800
$E_{90,g,moyen}$			300						
$G_{g,moyen}$	Module de cisaillement		650						
$\rho_{g,k}$	Masse volumique	kg/m ³	340	370	385	405	425	430	440
$\rho_{g,moyen}$			370	410	420	445	460	480	490

Tableau 3.3 Valeurs caractéristiques des bois massifs résineux et de peuplier (source: NF EN 338).

Symbole	Désignation	Unité	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
$f_{m,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	14	16	18	22	24	27	30	35	40
$f_{t,0,k}$	Contrainte de traction axiale		8	10	11	13	14	16	18	21	24
$f_{t,90,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire		0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
$f_{c,0,k}$	Contrainte de compression axiale		16	17	18	20	21	22	23	25	26
$f_{c,90,k}$	Contrainte de compression perpendiculaire		2,0	2,2	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
$f_{v,k}$	Contrainte de cisaillement		3	3,2	3,4	3,8	4	4	4	4	4
$E_{0,mean}$	Module moyen axial	kN/mm ²	7	8	9	10	11	11,5	12	13	14
$E_{0,05}$	Module axial au 5 ^e percentile		4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4
$E_{90,mean}$	Module moyen transversal		0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47
G_{mean}	Module de cisaillement		0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88
ρ_k	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	290	310	320	340	350	370	380	400	420
ρ_{mean}	Masse volumique moyenne		350	370	380	410	420	450	460	480	500

1.2.1.2 Moment d'écoulement plastique

Le moment d'écoulement plastique caractérise la résistance du boulon. Il est précisé par la formule:

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_u \cdot d^{2,6} \quad \text{équation 8.3 de l'Eurocode 5}$$

avec :

- $M_{y,Rk}$: moment caractéristique d'écoulement plastique, en N·mm ;
- f_u : résistance en traction du boulon de classe 6.8, soit $f_u = 600 \text{ N/mm}^2$;
- d : diamètre du boulon, en mm.

Pour notre exemple, avec des boulons de 16 mm de diamètre :

$$M_{y,Rk} = 0,3 \times 600 \times 16^{2,6} = 243\,212 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

1.2.1.3 Mode de rupture du boulon

Le boulon travaille en double cisaillement (équation 8.7 de l'Eurocode 5). La capacité résistante caractéristique ($F_{v,Rk}$) est calculée pour un organe et un plan de cisaillement. Il faut sélectionner la valeur minimale des quatre modes de ruptures suivant (figure 3.6) :

- g) écrasement du bois dans la pièce t_1 (moïse) ;
- h) écrasement du bois dans la pièce centrale t_2 (arbalétrier) ;
- j) écrasement du bois dans la pièce t_1 (moïse) et rotule plastique dans la tige ;
- k) écrasement des deux pièces de bois (moïse et arbalétrier) et rotule plastique dans la tige.

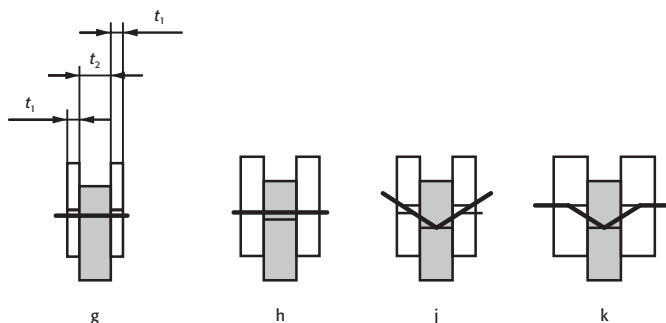


Figure 3.6 Modes de rupture d'une tige travaillant en double cisaillement.

Remarque: l'effet de corde ($F_{ax,Rk}/4$) est traité dans le § 1.2.1.4.

Écrasement du bois dans la première pièce (moïse):

Calcul de la résistance à la compression (enfoncement) de la tige dans la pièce 1 :

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d = 25,3 \times 100 \times 16 = 40\,459 \text{ N} \quad \text{(g)}$$

Écrasement du bois dans la deuxième pièce (arbalétrier):

Calcul de la résistance à la compression (enfoncement) de la tige dans la pièce 2 :

$$F_{v,Rk} = 0,5 f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d = 0,5 \times 26,5 \times 100 \times 16 = 21\,215 \text{ N} \quad \text{(h)}$$

**Écrasement du bois dans la première pièce (moisé) et rotule plastique dans la tige :**

Calcul de la résistance à la compression (enfoncement) de la tige dans la pièce 1 et de la résistance à la déformation plastique (irréversible) :

$$F_{v,Rk} = 1,05 \times \frac{f_{b,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4\beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{b,1,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (j)$$

$$F_{v,Rk} = 1,05 \times \frac{25,3 \times 100 \times 16}{2 + 1,05} \times \left[\sqrt{2 \times 1,05 \times (1 + 1,05) + \frac{4 \times 1,05 \times (2 + 1,05) \times 243\,212}{25,3 \times 100^2 \times 16}} - 1,05 \right] \quad (j)$$

$$F_{v,Rk} = 16\,749 \text{ N, sans l'effet de corde} \quad (j)$$

Écrasement des deux pièces (moisé et arbalétrier) et rotule plastique dans la tige :

Calcul de la résistance à la déformation plastique (irréversible) de la tige :

$$F_{v,Rk} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{b,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (k)$$

$$F_{v,Rk} = 1,15 \times \sqrt{\frac{2 \times 1,05}{1 + 1,05}} \times \sqrt{2 \times 243\,212 \times 25,3 \times 16} = 16\,324 \text{ N, sans l'effet de corde} \quad (k)$$

avec :

- $t_1 = 100 \text{ mm}$: épaisseur de la moisé ;
- $t_2 = 100 \text{ mm}$: épaisseur de l'arbalétrier ;
- $d = 16 \text{ mm}$: diamètre du boulon ;
- $f_{b,1,k} = 25,3 \text{ N/mm}^2$: portances locales dans la moisé ;
- $f_{b,2,k} = 26,5 \text{ N/mm}^2$: portances locales dans l'arbalétrier ;
- $\beta = 1,05$: ratio des portances locales ;
- $M_{y,Rk} = 243\,212 \text{ N}\cdot\text{mm}$: moment caractéristique d'écoulement plastique ;
- $F_{ax,Rk}/4$: effet de corde (cf. § 1.2.1.4).

Remarque : le mode de rupture a une influence sur la résistance de la structure lorsqu'une vérification vis-à-vis du séisme est réalisée. L'Eurocode 8 limite le diamètre des boulons à 16 mm pour favoriser le mode de rupture avec deux rotules plastiques, d'où une quantité d'énergie absorbée par chaque tige. Ce n'est pas le cas des équations (g) et (h), qui n'ont aucune rotule plastique. Ce mode de rupture est traduit par le coefficient de comportement q .

1.2.1.4 Effet de corde

Dans les équations (j) et (k), la tige se déforme. Il est possible d'ajouter une résistance correspondant à l'effet de corde ($F_{ax,Rk}/4$), avec $F_{ax,Rk}$ la résistance à l'arrachement. Cette valeur est plafonnée à 25 % de la partie de gauche de l'équation. Le calcul doit être effectué une première fois sans l'effet de corde (voir § 1.2.1.3), puis avec l'effet de corde.

La capacité à l'arrachement des boulons dépend de la résistance du bois sous la rondelle pour les assemblages bois/bois. Elle est déterminée par la formule :

$$F_{ax,Rk} = 3f_{c,90,k} \cdot \frac{\pi(D_{\text{rondelle}}^2 - d_{\text{rondelle}}^2)}{4}$$



avec :

- $f_{c,90,k}$: contrainte caractéristique de compression perpendiculaire du bois, en N/mm^2 (tableau 3.2);
- D_{rondelle} : diamètre extérieur de la rondelle, en mm; il doit avoir au moins un diamètre équivalent à trois diamètres du boulon;
- d_{rondelle} : diamètre intérieur de la rondelle, en mm.

Les dimensions des rondelles de charpente sont définies dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 Dimensions des rondelles de charpente, en mm.

Ø boulon	D_{rondelle}	d_{rondelle}	Épaisseur	Ø boulon	D_{rondelle}	d_{rondelle}	Épaisseur
12	40	14	4	20	60	22	6
14	45	16	5	22	65	24	6,5
16	50	18	5	24	75	26	7,5
18	55	20	6	27	90	30	8,5

Soit pour notre exemple :

$$F_{ax,Rk} = 3 \times 2,5 \times \frac{\pi(50^2 - 18^2)}{4} = 12\,818 \text{ N}$$

avec :

- $f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$: contrainte caractéristique de compression perpendiculaire du bois;
- $D_{\text{rondelle}} = 50 \text{ mm}$: diamètre extérieur de la rondelle;
- $d_{\text{rondelle}} = 18 \text{ mm}$: diamètre intérieur de la rondelle.

Soit un effet de corde maximum de $12818/4 = 3\,204 \text{ N}$.

Remarques :

- 1) Pour les assemblages par plaque métallique latérales, la résistance en traction du boulon est limitée :

$$F_{ax,Rk} \leq 3f_{c,90,k} \cdot \frac{\pi \left[D_{\text{maxi}}^2 - (d+2)^2 \right]}{4}$$

avec :

$$D_{\text{maxi}} = \text{minimum} \left\{ \begin{array}{l} 12t \\ 4d \end{array} \right\}$$

- t : épaisseur de plaque métallique, en mm;
- d : diamètre du boulon traversant la plaque métallique, en mm.

- 2) La valeur de calcul de la résistance en traction de l'acier étant généralement très supérieure à la valeur de calcul de la résistance en compression perpendiculaire du bois, la valeur minimale sera la résistance du bois.

La résistance caractéristique d'un plan de cisaillement d'un boulon sera :

- équation (g) : 40 459 N;
- équation (h) : 21 215 N;



- équation (j) : $16749 + 3204 = 19953$ N (3204 est, comme il le faut, inférieur ou égal à 25 % de 16749) ;
- équation (k) : $16324 + 3204 = 19528$ N (3204 est, comme il le faut, inférieur ou égal à 25 % de 16324).

La valeur la plus faible est : $F_{v,Rk} = 19528$ N.

Il faut transformer cette valeur caractéristique en valeur de calcul de la capacité résistante ou valeur design (équation 2.14 de l'Eurocode 5).

$$F_{v,Rd} = F_{v,Rk} \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

avec :

- $k_{mod} = 0,9$ car le bâtiment est situé à une altitude inférieure à 1000 m, la durée du chargement est de court terme et la classe de service est 1 (la charpente est visible, tableau 3.5) ;
- $\gamma_M = 1,3$ car c'est un assemblage (source : tableau 2.3 de l'Eurocode NF EN 1995-1-1).

Remarque : le calcul de la résistance d'une tige étant assez lourd, il est utile d'employer un logiciel.

Tableau 3.5 Valeur du facteur pour la durée de chargement k_{mod} (source : NF EN 1995-1-1/A1, tableau 3.1).

Durée de chargement		Classe de service (1)		
Classe de durée	Exemple	1 $H_{bois} < 13\%$ (local chauffé)	2 $13\% < H_{bois} < 20\%$ (sous abris)	3 $H_{bois} > 20\%$ (extérieur)
Permanente (> 10 ans)	Charge de structure	0,6	0,6	0,5
Long terme (6 mois à 10 ans)	Stockage	0,7	0,7	0,55
Moyen terme (1 semaine à 6 mois)	Charges d'exploitation Neige Altitude > 1000 m	0,8	0,8	0,65
Court terme (< 1 semaine)	Neige Altitude ≤ 1000 m	0,9	0,9	0,7
Instantanée	Vent Situation accidentelle Neige exceptionnelle	1,1	1,1	0,9
(1) On distingue 3 classes de service, numérotées 1, 2 et 3 :				
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 qui 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.				



La résistance d'un plan de cisaillement d'un boulon isolé sera de:

$$F_{v,Rd} = 19528 \times 0,9/1,3 = 13519 \text{ N}$$

Soit pour un boulon travaillant en double cisaillement: $13519 \times 2 = 27038 \text{ N}$.

Le nombre de boulons théorique sera l'effort repris par l'assemblage divisé par la résistance d'un boulon isolé, soit, pour notre exemple, $108000/27038 = 3,99$ boulons. Pour cet exemple, 4 boulons seraient trop faibles car lorsque plusieurs boulons sont dans le fil du bois, ils perdent de la résistance. Nous choisissons donc de positionner 3 files de 2 boulons dans l'arbalétrier et 2 files de 3 boulons dans l'entrait (figure 3.8).

1.2.2 Espacements et distances

On distingue les espacements entre les boulons et les distances aux rives et aux extrémités du bois. La résistance de l'assemblage dépend de l'espacement entre les boulons dans le sens du fil. Cette étape permet de définir cet espacement. Les espacements et les distances sont exprimés en fonction du diamètre du boulon et de l'orientation de la force par rapport au fil du bois. Par ailleurs, les distances aux rives et extrémités chargées seront plus importantes que les distances aux rives et extrémités non chargées (tableau 3.6).

Tableau 3.6 Espacements et distances des boulons.

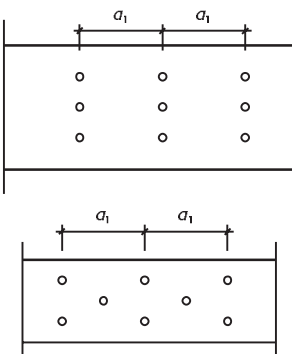
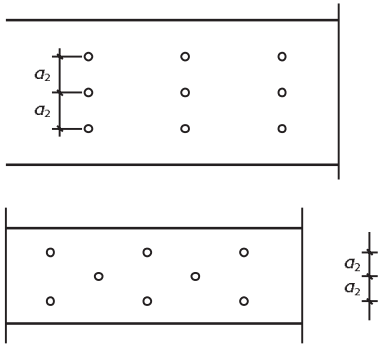
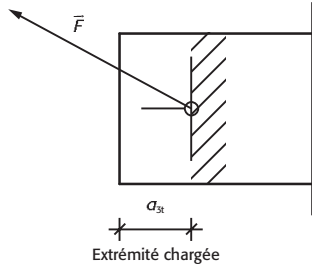
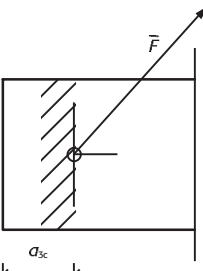
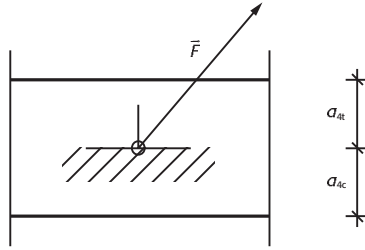
Pinces	Description	Angle entre l'effort et le fil du bois	Distance minimale
a_1	 <p>Espacement parallèle au fil</p>	Indépendant	$(4 + \cos \alpha)d$
a_2	 <p>Espacement perpendiculaire au fil</p>	Indépendant	$4d$

Tableau 3.6 (suite) Espacements et distances des boulons.

Pinces	Description	Angle entre l'effort et le fil du bois	Distance minimale
a_{3r}	 <p>Extrémité chargée Distance d'extrémité chargée</p>	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7d; 80 \text{ mm})$
a_{3c}	 <p>Extrémité non chargée Distance d'extrémité non chargée</p>	$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$\max[(1 + 6 \sin \alpha)d; 4d]$
a_{4r}	 <p>a_{4r} : rive chargée a_{4c} : rive non chargée Distance de rive chargée Distance de rive non chargée</p>	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max[(2 + 2 \sin \alpha)d; 3d]$
a_{4c}		$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

La convention d'orientation de la force par rapport au fil du bois est précisée sur la figure 3.7.

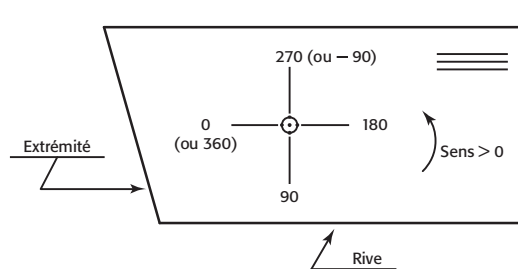


Figure 3.7 Convention d'orientation de la force par rapport au fil du bois.

Le tableau 3.6 indique les espacements et les distances des boulons nommés également conditions de pinces. α est l'angle entre l'effort et le fil du bois.

Le tableau 3.7 et la figure 3.8 indiquent la valeur des espacements et des distances des boulons de 16 mm de diamètre de l'assemblage de notre exemple.

Tableau 3.7 Valeur des espacements et des distances des boulons de 16 mm de diamètre de l'assemblage, en mm.

Pinces	Description	Arbalétrier: $\alpha = 0^\circ$		Entrait: $\alpha = 17^\circ$	
		Minimum	Sélection	Minimum	Sélection
a_1	Espacement parallèle au fil	$(4 + \cos 0) \times 16 = 80$	522	$(4 + \cos 17) \times 16 = 79,3$	226
a_2	Espacement perpendiculaire au fil	$4 \times 16 = 64$	65	$4 \times 16 = 64$	150
a_{3r}	Distance d'extrémité chargée	Sans objet		$\max(7 \times 16; 80) = 112$	327
a_{3c}	Distance d'extrémité non chargée	$\max[(1 + 6 \sin 0) \times 16; 4 \times 16] = 64$	209	Sans objet	
a_{4r}	Distance de rive chargée	Sans objet		$\max[(2 + 2 \sin 16,7) \times 16; 3 \times 16] = 48$	60
a_{4c}	Distance de rive non chargée	$3 \times 16 = 48$	60	$3 \times 16 = 48$	60

Cette étape a permis de définir l'espacement entre les boulons dans l'arbalétrier et dans l'entrait. Cette valeur est nécessaire pour définir le nombre efficace de boulons afin de connaître la résistance de l'assemblage.

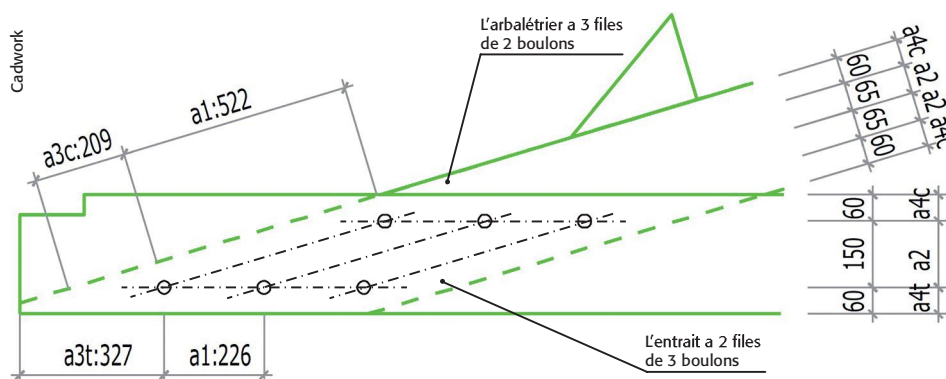


Figure 3.8 Position et valeur des espacements et des distances de l'assemblage.

1.2.3 Nombre efficace de boulons

Lorsque l'effort est parallèle au fil du bois et que plusieurs boulons sont sur une file parallèle au fil du bois, la résistance de l'assemblage diminue (effet de file). Le nombre efficace de boulons sera de :

$$n_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} n \\ n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \end{array} \right\} \quad \text{équation 8.34 de l'Eurocode 5}$$

avec :

- n_{ef} : nombre efficace de boulons dans la file ;
- n : nombre réel de boulons dans la file ;
- a_1 : espacement entre les boulons dans la file (parallèle au fil du bois), en mm ;
- d : diamètre des boulons, en mm.

Le tableau 3.8 précise l'espacement nécessaire entre les boulons pour obtenir un nombre efficace de boulons équivalent au nombre réel de boulons.

Tableau 3.8 Espacement nécessaire entre les boulons pour obtenir un nombre efficace de boulons équivalent au nombre réel de boulons.

Nombre de boulons dans la file	Espacement entre les boulons nécessaire pour que $n_{ef} = n$
2	$18d$
3	$21d$
4	$23d$
5	$25d$

1.2.3.1 Nombre efficace dans l'arbalétrier

L'arbalétrier a 3 files de 2 boulons (figure 3.8).

$$n_{\text{ef}} = \min \left\{ \frac{2}{\sqrt[20,94]{\frac{522}{13 \times 16}}} \right\} = 2$$

Soit un nombre efficace total de $2 \times 3 = 6$ boulons.

Remarque: il n'y a pas d'effet de fil car l'espacement entre les boulons est de $522/16 = 29d$, soit supérieur à $18d$ (tableau 3.8).

1.2.3.2 Nombre efficace dans l'entrait

L'entrait a 2 files de 3 boulons (figure 3.8).

$$n_{\text{ef}} = \min \left\{ \frac{3}{\sqrt[30,94]{\frac{226}{13 \times 16}}} \right\} = 2,74 \text{ boulons efficaces.}$$

Par ailleurs, lorsque l'effort est incliné par rapport au fil du bois, l'effet de file est moins important. Le nombre efficace de boulons est:

$$n_{\text{ef},\alpha} = n_{\text{ef},0} + \frac{\alpha}{90} \cdot (n - n_{\text{ef},0})$$

avec:

- n : nombre de boulons dans la file;
- α : angle entre l'effort et le fil du bois en degré;
- $n_{\text{ef},\alpha}$: nombre efficace de boulons dans la file avec un effort formant un angle α par rapport au fil du bois;
- $n_{\text{ef},0}$: nombre efficace de boulons dans la file avec un effort parallèle au fil du bois.

Soit, pour notre exemple, un nombre de boulons efficaces pour une file de:

$$n_{\text{ef},\alpha} = 2,74 + \frac{16,7}{90} \times (3 - 2,74) = 2,79$$

Soit pour 2 files de boulons, un nombre efficace total de $2,79 \times 2 = 5,58$ boulons.

1.2.3.3 Nombre efficace de l'assemblage

Le nombre efficace de l'assemblage sera le plus petit des deux pièces, soit 5,58.

1.3 Résistance et taux de travail de l'assemblage

La résistance de l'assemblage s'obtient en multipliant la résistance d'un boulon isolé par le nombre efficace de l'assemblage.

$$F_{v,Rd,ass} = F_{v,Rd,boulon} \cdot n_{\text{ef}}$$

$$F_{v,Rd,ass} = 27038 \times 5,58 = 150872 \text{ N}$$

Le taux de travail est: $F_{v,Ed}/F_{v,Rd,ass} = 108000/150872 = 0,71$,

avec $F_{v,Ed}$ l'effet des actions = 108000 N (figure 3.3).

$0,71 < 1$, le critère est vérifié.

Remarque: la marge du taux de travail est suffisamment importante pour envisager la vérification de l'assemblage avec 5 boulons.

1.4 Vérification du cisaillement et du fendage

Cette vérification concerne le bois autour des boulons.

1.4.1 Cisaillement

Lorsque l'assemblage transmet un effort tranchant (effort perpendiculaire à l'axe de l'élément), une contrainte de cisaillement apparaît. La hauteur de la section exposée au cisaillement est la distance entre le bord chargé et le perçage le plus éloigné (figure 3.9).

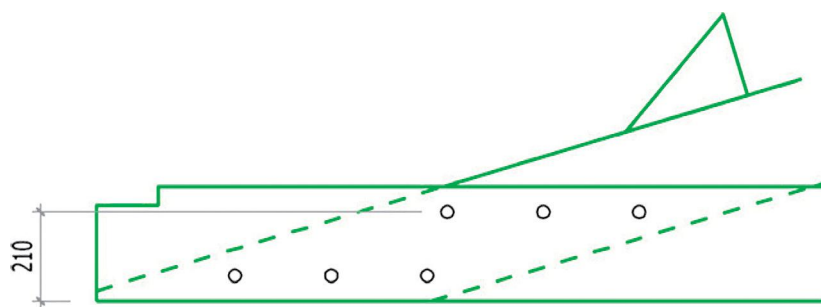


Figure 3.9 Hauteur cisailée.

Le taux de travail en cisaillement est :

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1 \quad \text{équation 6.13 de l'Eurocode 5}$$

avec :

- τ_d : contrainte de cisaillement de calcul, en N/mm^2 ;
- $f_{v,d}$: contrainte de résistance de cisaillement, en N/mm^2 .

1.4.1.1 τ_d : contrainte de cisaillement induite par la combinaison d'action des états limites ultimes (ELU)

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

$$\tau_d = \frac{k_f \cdot F_{v,d}}{k_{cr} \cdot b \cdot h_e}$$

avec :

- k_f : coefficient de forme 3/2 pour une section rectangulaire et 4/3 pour une section circulaire;
- $F_{v,d}$: effort tranchant, en N;
- h_e : hauteur réelle exposée au cisaillement (figure 3.9);
- b : épaisseur de la pièce, en mm;
- k_{cr} : défini dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9 Valeur de k_{cr} en fonction du matériau, de la section et du chargement.

	Classe de service 1	Classe de service 2	Classe de service 3
Bois massif avec toutes les dimensions de la section ≤ 150 mm	1	1	0,67
Bois massif dont une des dimensions de la section > 150 mm	0,67	0,67	0,67
Bois lamellé-collé avec moins de 70 % de charge permanente par rapport à la charge totale	1	1	0,67
Bois lamellé-collé avec au moins 70 % de charge permanente par rapport à la charge totale	1	0,67	0,67

Pour notre exemple :

$$\tau_d = \frac{1,5 \times 31\,000}{1 \times 2 \times 100 \times 210} = 1,1 \text{ N/mm}^2$$

avec :

- $k_f = 1,5$; coefficient de forme 3/2 pour une section rectangulaire et 4/3 pour une section circulaire;
- $F_{v,d} = 31\,000$ N (figure 3.10);
- $h_e = 210$ mm (figure 3.9);
- $b = 2 \times 100$ mm car il y a deux moises;
- $k_{cr} = 1$ (classe de service 1).

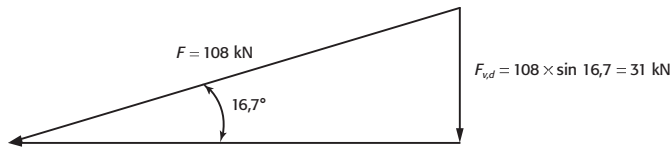


Figure 3.10 Calcul de l'effort tranchant.

1.4.1.2 $f_{v,d}$: contrainte de résistance de cisaillement

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

avec :

- $f_{v,k} = 3,5$ N/mm²: contrainte caractéristique (tableau 3.2);
- $k_{\text{mod}} = 0,9$: coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée et de la classe de service (tableau 3.5);
- $\gamma_M = 1,25$: coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau (nous vérifions le bois et non l'assemblage, tableau 3.10).

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

Tableau 3.10 Valeurs du coefficient γ_M (extrait du tableau 2.3 de l'Eurocode NF EN 1995-1-1).

Éléments considérés		γ_M
Matériaux	Bois	1,3
	Lamellé-collé	1,25
	Lamibois (LVL), OSB	1,2
Assemblages		1,3

1.4.1.3 Taux de travail

Le taux de travail est :

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = \frac{1,1}{2,5} = 0,44 < 1$$

Le critère est vérifié.

1.4.2 Fendage

Lorsque l'assemblage transmet un effort tranchant (effort perpendiculaire à l'axe de l'élément), il est nécessaire de réaliser la justification au fendage.

Le taux de travail est :

$$\frac{F_{v,d}}{F_{90,Rd}} \leq 1 \quad \text{équation 8.2 de l'Eurocode 5}$$

avec :

- $F_{v,d}$: effort tranchant maximum au niveau de l'assemblage, en N ;
- $F_{90,Rd}$: résistance de calcul au fendage, en N.

La résistance de calcul au fendage est déterminée par la formule :

$$F_{90,Rd} = F_{90,Rk} \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_M}$$

avec :

- $F_{90,Rk}$: résistance caractéristique au fendage, en N ;
- k_{mod} : coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée et de la classe de service ;
- γ_M : coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau.

Pour les résineux, la résistance caractéristique au fendage est déterminée par la formule :

$$F_{90,Rk} = 14b \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{b}\right)}} \quad \text{équation 8.4 de l'Eurocode 5}$$

avec :

- b : épaisseur de l'élément, en mm ;

- h_e : hauteur exposée à la traction perpendiculaire aux fibres, en mm (comme pour le cisaillement, la hauteur de la section exposée au risque de fendage est la distance entre le bord chargé et le perçage le plus éloigné, voir la figure 3.9);
- b : hauteur de la pièce, en mm.

Soit pour notre exemple:

$$F_{90,Rk} = 14 \times 2 \times 100 \times \sqrt{\frac{210}{\left(1 - \frac{210}{270}\right)}} = 86\,074 \text{ N}$$

avec:

- $b = 2 \times 100 \text{ mm}$ (deux moises);
- $h_e = 210 \text{ mm}$ (figure 3.9);
- $b = 270 \text{ mm}$.

D'où:

$$F_{90,Rd} = 86\,074 \times \frac{0,9}{1,25} = 61\,913 \text{ N}$$

avec:

- $F_{90,Rk} = 86\,074 \text{ N}$;
- $k_{\text{mod}} = 0,9$ car l'effort subi par l'assemblage est calculé avec la combinaison 1,35G + 1,5S avec une altitude inférieure à 1 000 m (tableau 3.5);
- $\gamma_M = 1,25$ (nous vérifions le bois et non l'assemblage, tableau 3.10).

Le taux de travail est:

$$\frac{F_{v,d}}{F_{90,Rd}} = \frac{31\,000}{61\,913} = 0,5 < 1$$

avec:

- $F_{v,d} = 31\,000 \text{ N}$ (figure 3.10);
- $F_{90,Rd} = 61\,913 \text{ N}$.

Le critère est vérifié.