

3. Les assemblages

3.1 Rôle des assemblages

Un assemblage est un dispositif qui permet de réunir et de solidariser plusieurs pièces entre elles, en assurant la transmission et la répartition des diverses sollicitations entre les pièces.

Les principaux modes d'assemblage sont :

- ✓ Le rivetage,
- ✓ Le boulonnage,
- ✓ Le soudage,
- ✓ Le collage

3. Assemblages par boulons

L'assemblage par boulon est un mode d'assemblage largement utilisé dans les montages et sur chantier. Un boulon est constitué d'une vis, en général à tête hexagonale, d'un écrou et d'une ou deux rondelles. Pour les ossatures principales on utilise le contre écrou.

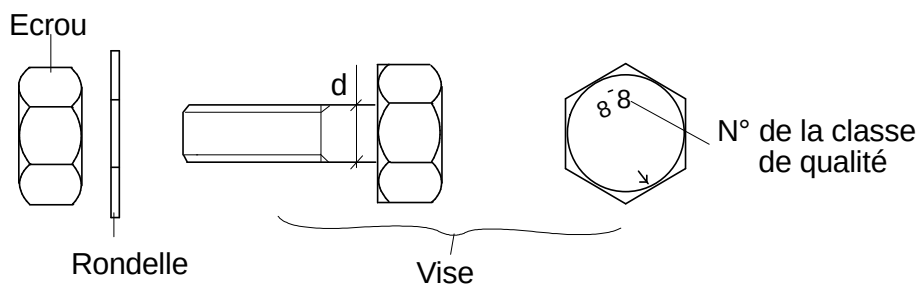


Figure 1 : boulon

Sections des vis :

Les vis utilisées en construction métallique ont des diamètres de 12 à environ 36 mm. Il s'agit du diamètre nominal de la vis (d), c'est-à-dire du diamètre de la partie cylindrique sans filetage. Dans les calculs, on utilisera l'aire A du fût de la vis (aire correspondant au diamètre nominal) ou l'aire A_s , aire de la section résistante de la vis.

d_m diamètre moyen de la tête du boulon ou de l'écrou (le plus faible des deux)

Tableau1 : Section de calcul du boulon de la partie lisse et de la partie filetée .

d (mm)	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30
d_m (mm)	18,3	20,5	23,7	24,6	29,1	32,4	34,5	38,8	44,2	49,6
A (mm ²)	78,5	113,1	153,9	201	254,5	314	380	452	572	707
A_s (mm ²)	58	84,3	115	157	192	245	303	353	459	561

Remarque : Les diamètres grisés sont utilisés moins couramment que les autres.

On distingue:

- les boulons ordinaires ;

- les boulons à haute résistance (notation HR) ou à serrage contrôlé;

3.1 Boulons ordinaires

Classes de qualité :

Pour les vis, la classe de qualité est désignée par 2 nombres. Le premier est égal au centième de la résistance à la traction exprimée en MPa, le produit du premier par le deuxième est la limite d'élasticité exprimée en MPa.

Ex : vis de classe 4.6

Résistance à la traction : $4 \times 100 = 400$ MPa

Limite d'élasticité : $10 (4 \times 6) = 240$ MPa.

Les classes utilisées en C.M. sont les suivantes :

4.6 4.8 5.6 5.8 6.8 8.8 10.9

La classe de l'écrou est indiquée par le premier nombre seulement.

L'écrou doit être d'une classe au moins égale à celle de la vis qui lui est associée.

La classe est indiquée par marquage sur les vis et les écrous.

Les boulons ordinaires peuvent travailler en traction, effort dirigé suivant l'axe de la vis, ou en cisaillement, effort perpendiculaire à l'axe de la vis. Dans ce dernier cas, il peuvent être sollicités en simple cisaillement (une seule section cisailée) ou double cisaillement (deux sections cisailées)

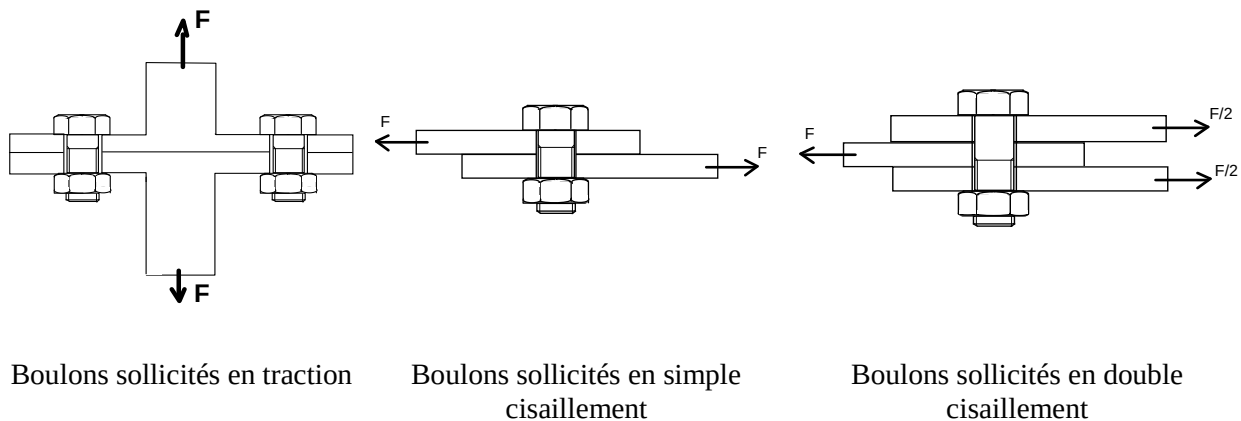


Figure2 : mode de travail des boulons ordinaire

Pour les boulons ordinaires, l'effort de serrage n'est pas contrôlé et dans le cas d'assemblages travaillant en cisaillement, les pièces assemblées vont glisser jusqu'à venir s'appuyer sur la tige de la vis de manière à la cisailier.

3.2 Boulons HR (Haute Résistance)

Le serrage des boulons à haute résistance se fait avec un couple important dont la valeur est calculée au préalable. La vis ainsi mise en tension va appliquer fortement l'une contre l'autre les pièces à assembler (précontrainte). Cette pression concerne une surface égale à peu près à huit fois la section résistante de la vis.

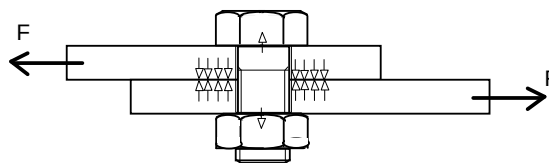


Figure 3 : boulon HR

Du fait de cette pression importante et du coefficient de frottement entre les pièces assemblées, le glissement ne va plus être possible ou va se produire très difficilement.

Dans le cas d'un assemblage sollicité avec un effort perpendiculaire à l'axe des boulons, les vis ne travailleront pas au cisaillement (sauf si l'effort appliqué est très important et arrive à vaincre le frottement).

On utilise deux classes de vis :

8.8 10.9

Les vis ont une collerette sous la tête. Les écrous, (qualité 8 pour les vis 8.8 et 10 pour les 10.9) portent une marque spéciale de même que les vis. L'utilisation de rondelles (au moins une sous la tête qui tourne quand on serre) est obligatoire.

Les filetages sont obtenus par roulage afin de ne pas fragiliser la vis.

Le coefficient de frottement μ entre les pièces assemblées dépend de leur état de surface.

Tableau 7 : Coefficient de frottement μ

Coefficient de frottement μ	Etat de surface
0,50	surfaces décapées par grenaillage ou sablage et éventuellement métallisées par projection d'aluminium ou d'un revêtement à base de zinc.
0,40	surfaces décapées par grenaillage ou sablage avec couche de peinture au silicate de zinc alcalin
0,30	surfaces nettoyées par brossage métallique ou à la flamme.
0,20	surfaces non traitées.

L'effort de précontrainte maximum que peut subir la vis est :

$$F_{p,Cd} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$$

f_{ub} est la résistance à la traction du boulon (indice b = boulon ou bolt en anglais).

Pour atteindre cette précontrainte, il faudra appliquer à la tête du boulon un couple :

$$C = k \cdot d \cdot F_{p,Cd}$$

k = coefficient de frottement écrou-rondelle donné par le fabricant.

Il varie de 0,15 à 0,16. De nouveaux boulons devraient apparaître sur le marché : leur coefficient sera de 0,12 et on devra serrer obligatoirement l'écrou, jamais la tête.

3.3 Coefficients partiels de sécurité

Les coefficients partiels de sécurité à utiliser pour les assemblages boulonnés sont les suivants :

$$\begin{aligned} \gamma_{M2} &= 1,5 && \text{pour la résistance des boulons sollicités à la traction} \\ \gamma_{M2} &= 1,25 && \text{pour les autres cas.} \end{aligned}$$

Pour les boulons à haute résistance interviennent également des coefficients de sécurité sur la résistance au glissement :

● pour les trous normaux et les trous oblongs dont l'axe de la fente est perpendiculaire à la direction de l'effort de glissement

$$\begin{aligned} \gamma_{Ms,ult} &= 1,10 && \text{pour l'état limite ultime} \\ \gamma_{Ms,ser} &= 1,20 && \text{pour l'état limite de service} \end{aligned}$$

- pour les trous surdimensionnés et les trous oblongs dont l'axe de la fente est parallèle à la direction de l'effort de glissement
 $\gamma_{Ms,ult} = 1,25$ (le calcul ne se fait qu'à l'état limite ultime)

3.4 Dispositions constructives

Diamètres des trous (d_0):

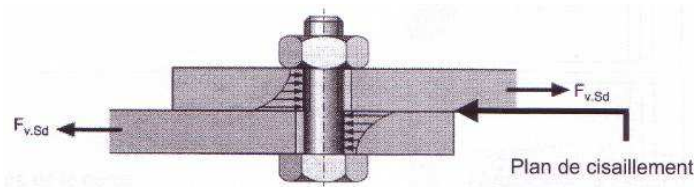
Les trous des boulons sont forés ou poinçonnés. Ils présentent un jeu par rapport au diamètre nominal de la vis.

diamètre de la vis (d) = 12 et 14 mm	$d_0 = d + 1$
diamètre de la vis (d) = 16 à 24	$d_0 = d + 2$
diamètre de la vis (d) > à 27	$d_0 = d + 3$

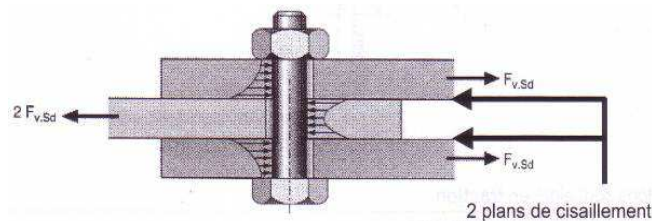
Il existe également des trous surdimensionnés ou oblongs pour lesquels les jeux sont supérieurs à ceux donnés ci-dessus.

3.5 Vérification des assemblages

3.5.1 Assemblages travaillant au cisaillement



1 plan de cisaillement



2 plans de cisaillement

3.5.1.1 Résistance de calcul des boulons

Comme pour les rivets la ruine peut intervenir lorsqu'il y a cisaillement de la tige des boulons ou lorsque la pression diamétrale au contact vis - bord du trou est trop importante.

* Résistance au cisaillement par plan de cisaillement :

- le plan de cisaillement passe par la partie filetée de la vis :

- classes 4.6, 5.6, 6.6 et 8.8

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6f_{ub}A_s}{\gamma_{M2}}$$

f_{ub} = résistance à la traction du boulon

- classes 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9

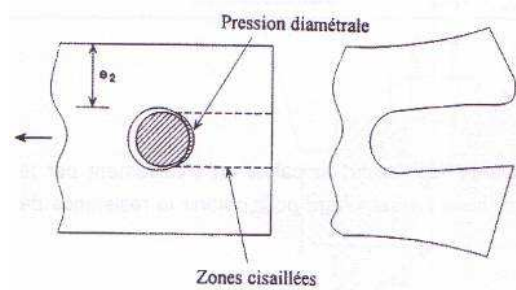
$$F_{v,Rd} = \frac{0,5f_{ub}A_s}{\gamma_{M2}}$$

- le plan de cisaillement passe par la partie non filetée de la vis.

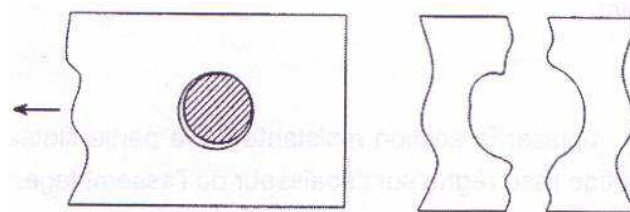
$$F_{v,Rd} = \frac{0,6f_{ub}A}{\gamma_{M2}}$$

* Résistance à la pression diamétrale :

On doit aussi vérifier à la pression diamétrale en concomitance avec les efforts de cisaillement: si la pression diamétrale est trop importante on observe une ovalisation non maîtrisée des trous de perçages. Deux types de ruines sont possibles si la pression devient vraiment trop excessive, en plus du risque de ruine par cisaillement:



Ruine par arrachement



Ruine en section nette

$F_{b,Rd}$ = Résistance à la pression diamétrale

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5\alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

Avec : f_u = résistance à la traction des pièces assemblées

d = diamètre nominal de la vis

t = épaisseur de la plus mince des pièces assemblées

$$\alpha = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right\}$$

N.B. : $F_{b,Rd}$ doit toujours être inférieure à $2,0 f_{ub} d$

*** Résistance au glissement pour les boulons à haute résistance**

La pression exercée par les boulons à haute résistance sur les éléments assemblés empêche leur glissement. On pourra donc calculer, quand ces boulons sont utilisés, une résistance au glissement $F_{s,Rd}$.

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{Ms}} F_{p,Cd}$$

Avec : $F_{p,Cd}$ = effort de précontrainte

μ = coefficient de frottement des surfaces assemblées

n = nombre d'interfaces de frottement

k_s = facteur de forme du trou

$k_s = 1$ si les trous sont normaux

$k_s = 0,85$ si les trous sont surdimensionnés ou oblongs courts,

$k_s = 0,7$ s'ils sont oblongs longs.

3.5.1.2 Catégories d'assemblages

On classe les assemblages en catégories selon la manière dont ils travaillent.

• Catégorie A : Assemblages travaillant à la pression diamétrale.

Ils peuvent être réalisés avec des boulons allant de la classe 4.6 à 10.9 comprise. Aucune précontrainte n'est requise.

Les vérifications à faire concernent l'effort de cisaillement de calcul exercé sur chaque boulon à l'état limite ultime $F_{v,Sd}$:

$$\begin{aligned} F_{v,Sd} &\leq F_{v,Rd} \\ F_{v,Sd} &\leq F_{b,Rd} \end{aligned}$$

• Catégorie B : Assemblages résistant au glissement à l'état limite de service.

Ils sont réalisés avec des boulons à haute résistance avec un serrage contrôlé. Il ne doit pas se produire de glissement à l'état limite de service.

Les vérifications à faire concernent l'effort de cisaillement de calcul exercé sur chaque boulon à l'état limite ultime $F_{v,Sd}$ et l'effort de glissement de calcul exercé sur chaque boulon à l'état limite de service $F_{v,Sd,ser}$

$$\begin{aligned} F_{v,Sd,ser} &\leq F_{s,Rd,ser} \\ F_{v,Sd} &\leq F_{v,Rd} \\ F_{v,Sd} &\leq F_{b,Rd} \end{aligned}$$

• Catégorie C : Assemblages résistant au glissement à l'état limite ultime.

Ils sont réalisés avec des boulons à haute résistance et avec un serrage contrôlé. Il ne doit pas se produire de glissement à l'état limite ultime.

Les vérifications à faire concernent l'effort de cisaillement de calcul exercé sur chaque boulon à l'état limite ultime $F_{v,Sd}$.

$$F_{v.Sd} \leq F_{s.Rd}$$

$$F_{v.Sd} \leq F_{b.Rd}$$

Il y a une vérification supplémentaire concernant la résistance plastique de la section nette au droit des trous de boulon $N_{net.Rd}$.

$$N_{net.Rd} = A_{net} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

3.5.2 Assemblages travaillant en traction

3.5.2.1 Résistance de calcul des boulons

Pour tous les boulons, la résistance de calcul en traction est :

$$F_{t.Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

3.5.2.2 Catégories d'assemblages

- **Catégorie D : Assemblages par boulons non précontraints.**

Ils peuvent être réalisés avec tous les types de boulons. Aucune précontrainte n'est requise.

Ces assemblages ne doivent pas être utilisés dans le cas où la sollicitation de traction est soumise à des variations fréquentes (on peut cependant les utiliser pour résister à des actions usuelles de vent).

- **Catégorie E : Assemblages par boulons précontraints à haute résistance.**

Ils sont réalisés avec des boulons à haute résistance. Ces assemblages sont utiles lorsqu'il se pose des problèmes de fatigue.

Pour ces deux catégories d'assemblages, les vérifications à faire sont identiques et concernent l'effort de traction par boulon à l'état limite ultime $F_{t.Sd}$.

$$F_{t.Sd} \leq F_{t.Rd}$$

Dans les assemblages en traction, il peut se produire un poinçonnement au niveau de la tête du boulon. Dans ce cas, la vérification à faire sera la suivante :

$$F_{t.Sd} \leq B_{t.Rd}$$

$B_{t.Rd}$ est la résistance en traction de l'ensemble plaque - boulon.

$$B_{t.Rd} = \min\{F_{t.Rd}; B_{p.Rd}\}$$

$$B_{p.Rd} = 0,6\pi d_m t_p \frac{f_u}{\gamma_{Mb}}$$

$B_{p.Rd}$ est la résistance au cisaillement par poinçonnement de la tête du boulon.

t_p = épaisseur de la plaque sous la tête du boulon ou de l'écrou

d_m = diamètre moyen de la tête du boulon ou de l'écrou (plus petite des deux valeurs).

Remarque :

Pour certains assemblages en traction, il peut se produire un effet de levier qui augmente l'effort de traction sur les boulons. Cet effet dépend des rigidités relatives des différentes parties de l'assemblage. (cf. schéma ci-contre)

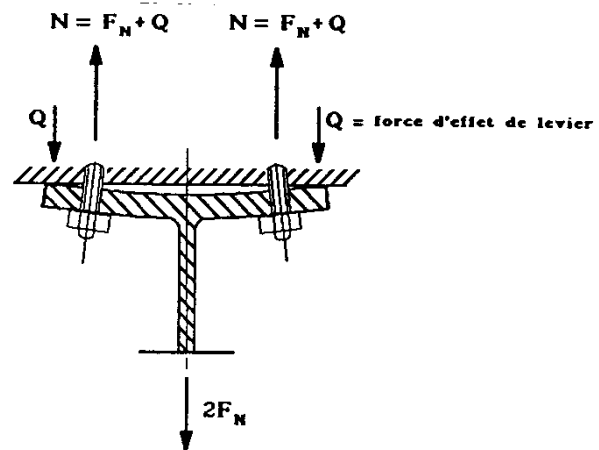


Figure 14 : Assemblage produisant un effet de levier

3.5.3 Assemblages soumis à des efforts combinés de cisaillement et de traction.

3.5.3.1 Résistance des boulons

Les boulons soumis à des efforts combinés de cisaillement et de traction devront satisfaire aux vérifications requises en traction, au cisaillement, plus une vérification supplémentaire.

$$\begin{aligned}F_{t.Sd} &\leq F_{t.Rd} \\F_{t.Sd} &\leq B_{p.Rd} \\F_{v.Sd} &\leq F_{b.Rd} \\ \frac{F_{v.Sd}}{F_{v.Rd}} + \frac{F_{t.Sd}}{1,4F_{t.Rd}} &\leq 1\end{aligned}$$

3.5.3.2 Résistance au glissement

Si un assemblage résistant au glissement supporte un effort de traction, la résistance au glissement de chaque boulon est calculée selon les formules ci-dessous :

- **Catégorie B : assemblages résistant au glissement à l'état limite de service.**

$$F_{s.Rd.ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu (F_{p.Cd} - 0,8 \cdot F_{t.Sd.ser})}{\gamma_{Ms.ser}}$$

- **Catégorie C : assemblages résistant au glissement à l'état limite ultime.**

$$F_{s.Rd} = \frac{k_s n \cdot \mu (F_{p.Cd} - 0,8 \cdot F_{t.Sd})}{\gamma_{Ms,ult}}$$

Remarque :

Si l'assemblage résiste en flexion, de telle manière que l'effort de traction est contrebalancé par un effort de contact du côté comprimé, il n'est pas nécessaire de réduire la résistance au glissement.

3.6 Vérification au cisaillement de bloc

Lorsqu'on a un groupe de trous de fixation à l'extrémité d'une âme de poutre ou d'une console, il peut se produire un cisaillement de bloc. Cela se traduit par l'arrachement d'une partie (représentée hachurée sur les dessins ci-dessous).

On détermine la résistance efficace au cisaillement de bloc :

$$V_{eff.Rd} = \frac{f_y A_{v,eff}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

	L'aire efficace de cisaillement est donnée par : $A_{v,eff} = t \cdot L_{v,eff}$ t = épaisseur de l'âme ou de la console pouvant être cisailée en bloc $L_{v,eff} = L_v + L_1 + L_2$ mais $L_{v,eff} \leq L_3$ $L_1 = a_1$ mais $L_1 \leq 5d$ $L_2 = (a_2 - kd_{0,t}) \frac{f_u}{f_y}$ $L_3 = L_v + a_1 + a_3$ mais $L_3 \leq (L_v + a_1 + a_3 - nd_{0,v}) \frac{f_u}{f_y}$ $d_{0,t}$ = diamètre des trous le long de la ligne tendue du bloc $d_{0,v}$ = diamètre des trous le long de la ligne cisailée du bloc n = nombre de trous de fixation le long de la ligne cisailée du bloc k = 0,5 pour une seule rangée de boulons k = 2,5 pour deux rangées de boulons.
--	---

3.7 Cas des assemblages longs

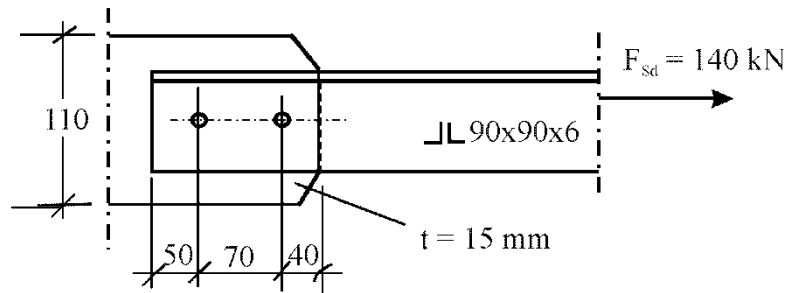
Lorsque, dans le sens de transmission des efforts, la distance entre les centres des éléments d'attache extrêmes est supérieur à 15d, la résistance au cisaillement $F_{v,Rd}$ de tout les élément d'attache devra être réduite.

un coefficient minorateur sur la résistance est :

3.6 Application

Exercice N° 1

L'assemblage deux cornières (L90x90x6) a un gousset (t = 15 mm) est réalisé par deux boulons M20 classe 8.8, les deux cornières sont soumis à un effort de traction dont l'intensité est $F_{Sd} = 140$ kN. L'acier utilisé pour les cornières et le gousset est le S275.



Vérifier la résistance de cet assemblage ?

Solution :

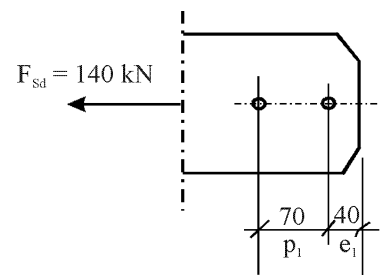
Vérification de la résistance des boulons

$$F_{v,Rd} = n \cdot m \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = 2 \times 2 \frac{0,6 \times 800 \times 245}{1,25} = 375,310^3 \text{ N} = 375,3 \text{ kN} > 140 \text{ kN}$$

Vérification de la pression diamétrale

*** Du plat**

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \times 0,61 \times 430 \times 20 \times 15}{1,25} = 157,4 \cdot 10^3 \text{ N} = 157,4 \text{ kN} > \frac{F_{v,Sd}}{2} = \frac{140}{2} = 70 \text{ kN}$$

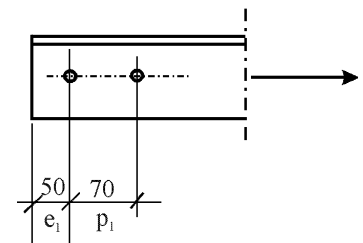


Avec :

$$\alpha = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0} = \frac{40}{3 \times 22} = 0,61; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{70}{3 \times 22} - \frac{1}{4} = 0,81; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{430} = 1,86; 1 \right\} = 0,61$$

*** De la cornière**

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{Mb}} = \frac{2,5 \times 0,61 \times 430 \times 20 \times 2 \times 6}{1,25} = 156,8 \cdot 10^3 \text{ N} = 156,8 \text{ kN} > \frac{F_{v,Sd}}{2} = 70 \text{ kN}$$



Avec :

$$\alpha = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0} = \frac{50}{3 \times 22} = 0,76; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{70}{3 \times 22} - \frac{1}{4} = 0,81; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{430} = 1,86; 1 \right\} = 0,76$$

*** Vérification de la traction des cornières :**

La résistance plastique de calcul de la section brute, $N_{pl,Rd}$ est égale à :

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2 \times 1050 \cdot 275}{1,0} = 577,510^3 \text{ N}$$

La résistance ultime de calcul de la section nette, $N_{u,Rd}$ est égale à :

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,482 \times 2 \times (1050 - 22 \times 6) \times 430}{1,25} = 304,4 \cdot 10^3 \text{ N} = 304,4 \text{ kN} > 140 \text{ kN}$$

Avec :

$\beta_2 = 0,482$ par interpolation (voir cours sur la traction en page 27- tableau(IV.3))

pour $2,5d_0 = 2,5 \times 22 = 55 \text{ mm} \rightarrow \beta_2 = 0,4$

pour $5d_0 = 5 \times 22 = 110 \text{ mm} \rightarrow \beta_2 = 0,7$

$$\min(N_{pl,Rd}, N_{u,Rd}) = 152,4 \text{ kN} > 140 \text{ kN}$$

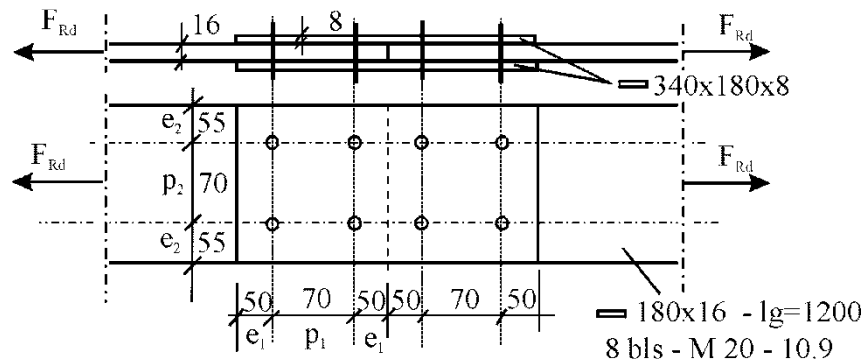
*** Vérification du gousset :**

La résistance ultime de calcul de la section nette, $N_{u,Rd}$ est égale à :

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \times (110 - 22) \times 15 \times 430}{1,25} = 408,6 \cdot 10^3 \text{ N} = 408,6 \text{ kN} > 140 \text{ kN}$$

Exercice N° 2 :

L'assemblage de deux plats (—180x16 acier S235) bout a bout est réalisé par deux couvre-joints (—340x180x8 acier S235) et des boulons HR M20 classe 10-9 (boulons résistant au glissement à l'ELU) comme le montre la figure suivante :



Trouver l'effort F_{Rd} maximum que peut supporté cette assemblage ?

Solution :

Considérant l'équilibre de la partie gauche de l'assemblage

Précontrainte sur le boulon

$$F_{p,Cd} = 0,7 \times 1000 \times 245 = 171,5 \cdot 10^3 \text{ N} = 171,5 \text{ kN}$$

Effort de glissement que peut supporté un boulon est de :

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{Ms}} F_{p,Cd} = \frac{1,0 \times 2 \times 0,5}{1,1} 171,5 = 155,9 \text{ kN}$$

L'effort que peut transmettre les quatre boulons est de : $155,9 \times 4 = 623,6 \text{ kN}$

Effort maximum par boulon dû a la pression diamétrale

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{Mb}} = \frac{2,5 \times 0,758 \times 360 \times 20 \times 16}{1,25} = 174,6 \cdot 10^3 \text{ N} = 174,6 \text{ kN}$$

Avec :

$$\alpha = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0} = \frac{50}{3 \times 22} = 0,758; \quad \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{70}{3 \times 22} - \frac{1}{4} = 0,81; \quad \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{1000}{360} = 2,778; \quad 1 \right\} = 0,758$$

L'effort maximum que peut supporté l'assemblage est de : $174,6 \times 4 = 698,4 \text{ kN}$

Effort de traction ultime :

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{(180 - 2 \times 22) \times 16 \times 235}{1,1} = 464,9 \cdot 10^3 \text{ N} = 464,9 \text{ kN}$$

$$N_{pl,Rd} = A \times f_y / \gamma_{M0} = 180 \times 16 \times 235 / 1,1 = 615,2 \text{ kN}$$

Effort maximum que peut supporté cette assemblage est de : $F_{Rd} = 464,9 \text{ kN}$
