



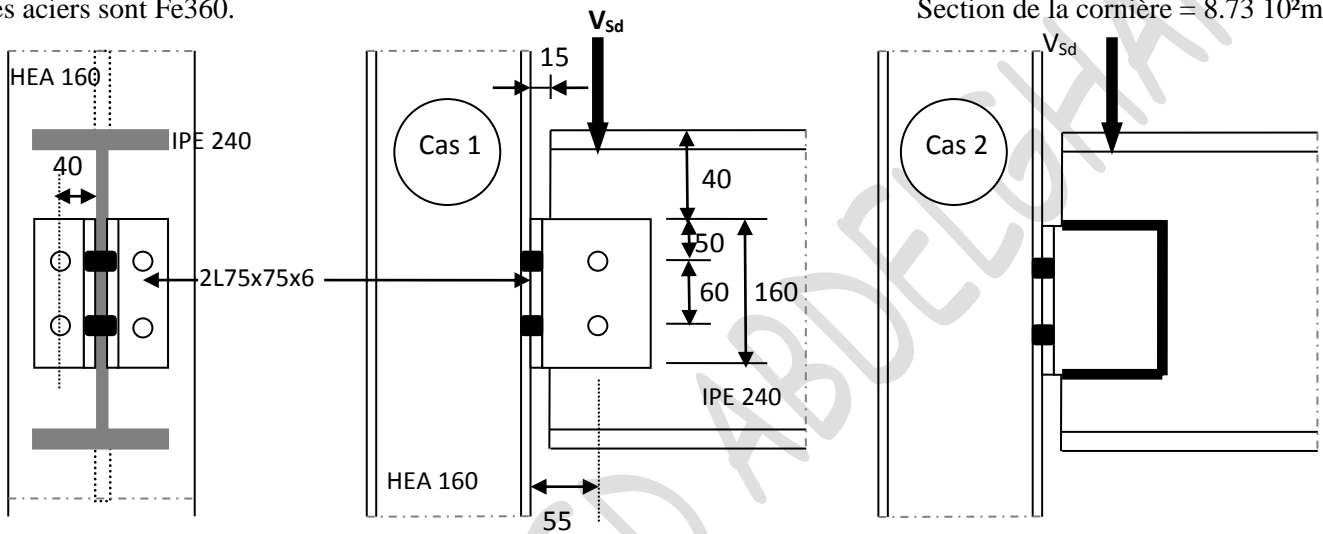
Problème (20 pts)

Soit l'assemblage poutre-poteau avec double cornière constitué d'un poteau **HEA 160**, d'une poutre **IPE 240** et d'une double cornière **2L75x75x6**. Dans un premier cas, les cornières sont boulonnées et dans le deuxième cas, les cornières sont boulonnées sur le poteau et soudées sur la poutre.

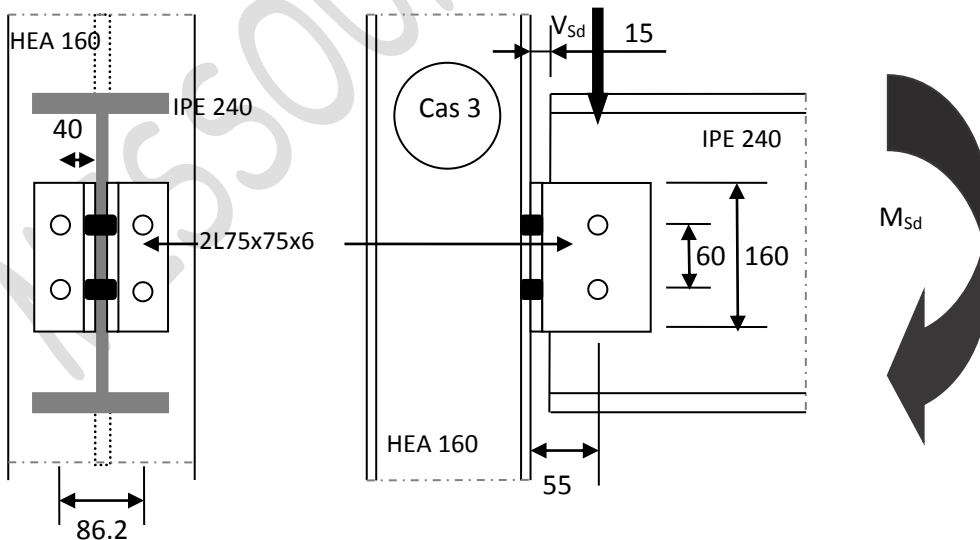
Les boulons utilisés sont des **M20 (8.8)** non précontraints. La partie cisailée se trouve en partie filetée. Surfaces des pièces en contact de classe B ($\mu = 0.4$). Les cordons de soudure ont pour épaisseur **a=5mm**.

Les aciers sont Fe360.

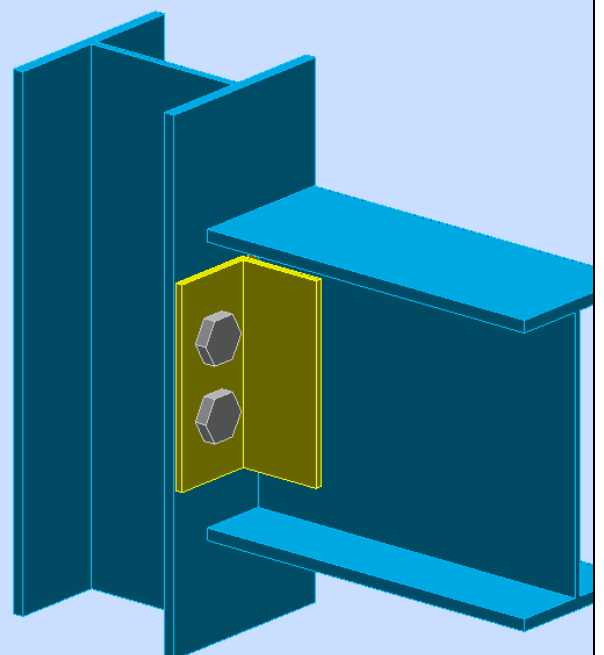
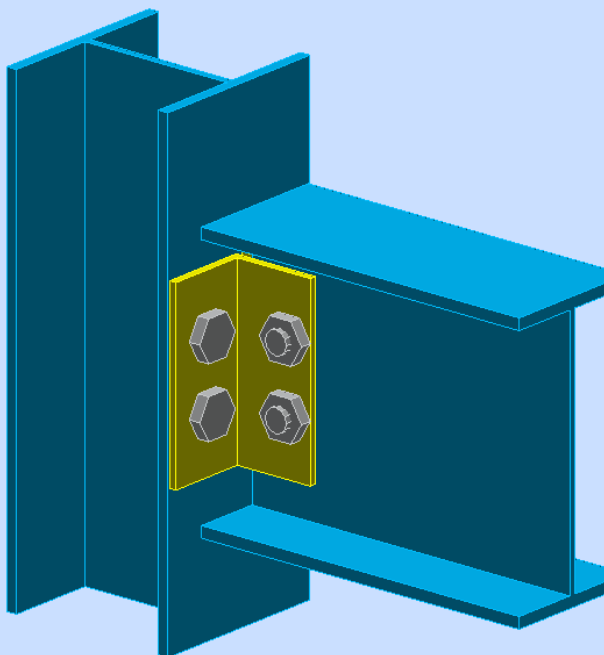
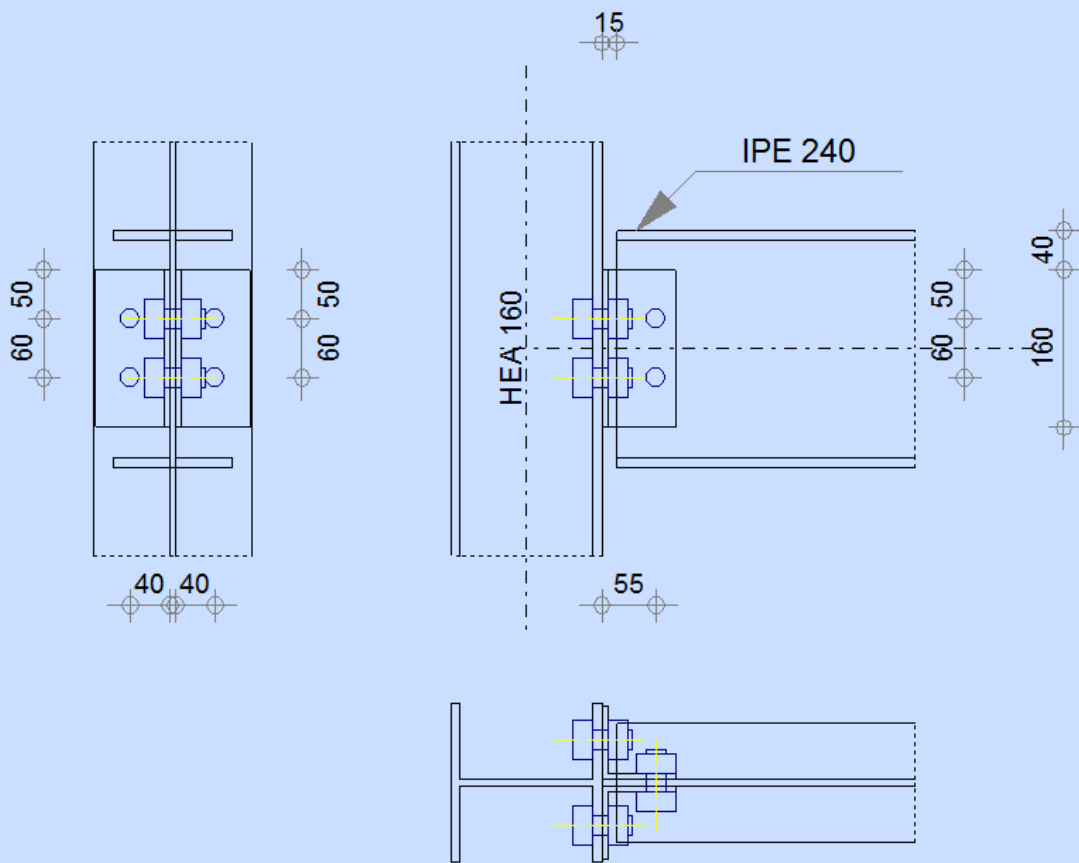
Section de la cornière = $8.73 \cdot 10^2 \text{mm}^2$



1. Cas 1 : Vérifier la résistance des cornières et des boulons (8 pts)
2. Cas 2 : Vérifier la résistance des cordons de soudure (2 pts)
3. Faire une analyse des deux cas (2 pts)
4. Vérifier la résistance des boulons dans le Cas 1 où les boulons sont précontraints (4 pts)
5. Vérifier la résistance de l'assemblage (*dans le cas de boulons non précontraints*) où il est sollicité par un effort de cisaillement et un moment (cas 3) pour une distribution élastique des efforts. (4 pts)



$V_{sd} = 70 \text{kN}; \quad M_{sd} = 60 \text{kN.m}$



1. Vérification de la résistance des cornières et des boulons

1.1. Vérification de la résistance des cornières

Les deux cornières sont sollicitées à la traction. On doit vérifier leur résistance à la traction en section brute et nette ainsi qu'à la pression diamétrale.

1.1.1. Vérification à la pression diamétrale

1.1.1.1. Cornières coté Poutre

La résistance des pièces à la pression diamétrale « $F_{b,Rd}$ » est donnée par la formule :

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{Mb}} \quad 0,25 \text{ pt}$$

Avec :

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right) ; 2,5 \right] \quad 0,25 \text{ pt}$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right) ; \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 \right) ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1 \right]$$

$k_1 = f_u$: limite élastique des pièces assemblées = 235 MPa

d : diamètre du boulon = 20 mm ; d_0 : diamètre du trou du boulon = 22 mm

t : la plus petite épaisseur des pièces assemblées = 6 mm

Pinces et pas : $e_1 = 50$ mm ; $e_2 = 20$ mm, $p_1 = 60$ mm

$\gamma_{Mb} = 1,25$

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \times \frac{20}{22} - 1,7 \right) ; 2,5 \right]$$

$$k_1 = \min[0,85 ; 2,5]$$

$$k_1 = 0,85 \quad 0,25 \text{ pt}$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{50}{3 \times 22} \right) ; \left(\frac{60}{3 \times 22} - 0,25 \right) ; \frac{800}{360} ; 1 \right]$$

$$\alpha_b = \min[(0,75) ; (0,66) ; 2,22 ; 1]$$

$$\alpha_b = 0,66 \quad 0,25 \text{ pt}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{Mb}} = \frac{0,85 \times 0,66 \times 360 \times 20 \times 6}{1,25} = 19388 \text{ N} = 19,4 \text{ kN} \quad 0,25 \text{ pt}$$

Nous avons 2 cornières sollicitées simultanément avec 2 trous. Par conséquent, l'effort appliqué V_{sd} est divisé par 4. 0,5 pt

$$\frac{V_{sd}}{4} = \frac{70}{4} = 17,5 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 19,4 \text{ kN} \quad 0,5 \text{ pt}$$

Pas de rupture des cornières par pression diamétrale 0,25 pt

1.1.1.2. Cornières coté Poteau

Coté poteau, nous avons 2 cornières avec 2 boulons. Par conséquent, on a la même formulation de vérification qu'en 1.1.1. 0,5 pt

Alors, il n'y a pas de rupture des cornières au niveau du poteau¹. 0,5 pt

¹ Dans cette partie, on n'a pas vérifié la résistance à la pression diamétrale des âmes de la poutre et du poteau car ça n'a pas été demandé dans l'exercice.

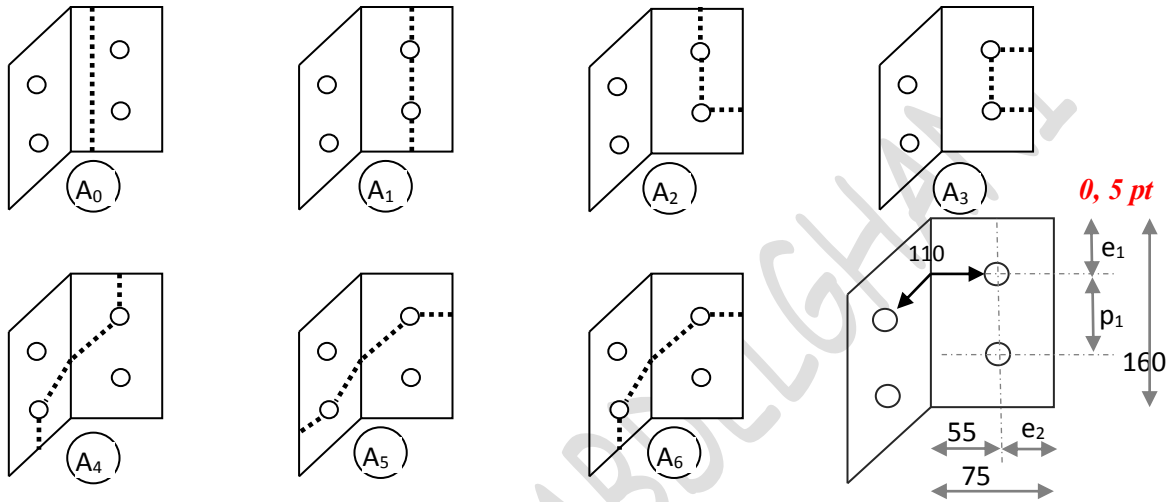
1.1.2. Vérification à la traction en section brute et nette

L'effort résistant d'une pièce en traction est donnée par :

$$N_{t,Rd} \leq \min[N_{Pl,Rd} ; N_{u,Rd} ; N_{net,Rd}] \quad \text{0,25 pt}$$

Les boulons ne sont pas précontraints, alors, il n'y a pas lieu de vérifier la résistance plastique de la section nette ($N_{net,Rd}$).

Calcul de la section brute et nette



$$A_0 = 0.6 \times 160 \times 6 = 576 \text{ mm}^2 \quad \text{Section Brute}$$

$$A_1 = A_0 - 2 \times d_0 \times t = 576 - 2 \times 22 \times 6 = 312 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = [0.6 \times (e_1 + p_1) + e_2] \times t - 2 \times d_0 \times t = [0.6 \times (50 + 60) + 20] \times 6 - 2 \times 22 \times 6 = 252 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = [(0.6 \times p_1) + 2 \times e_2] \times t - 2 \times d_0 \times t = [(0.6 \times 60) + 2 \times 20] \times 6 - 2 \times 22 \times 6 = 192 \text{ mm}^2$$

$$A_4 = [(2 \times 0.6 \times e_1) + (110 + (p_1)^2 / 4 \times 110)] \times t - 2 \times d_0 \times t$$

$$= [(2 \times 0.6 \times 50) + (110 + (60^2 / 4 \times 110))] \times 6 - 2 \times 22 \times 6 = 805 \text{ mm}^2$$

$$A_5 = [(2 \times e_2) + (110 + (p_1)^2 / 4 \times 110)] \times t - 2 \times d_0 \times t$$

$$= [(2 \times 20) + (110 + (60^2 / 4 \times 110))] \times 6 - 2 \times 22 \times 6 = 685 \text{ mm}^2$$

$$A_6 = [(0.6 \times e_1 + e_2) + (110 + (p_1)^2 / 4 \times 110)] \times t - 2 \times d_0 \times t$$

$$= [(0.6 \times 50 + 20) + (110 + (60^2 / 4 \times 110))] \times 6 - 2 \times 22 \times 6 = 745 \text{ mm}^2$$

$$A_{nette} = \min(A_1 ; A_2 ; A_3 ; A_4 ; A_5 ; A_6)$$

$$A_{nette} = A_3 = 192 \text{ mm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = A_0 \times f_y / \gamma_{M0} = 576 \times 235 / 1.10$$

$$\gamma_{M0} = 1.10 \text{ "CCM97"}$$

$$N_{pl,Rd} = 123054 \text{ N} = 123 \text{ kN}$$

$$N_{u,Rd} = 0.9 \times A_{net} \times f_u / \gamma_{M2} = 0.9 \times 192 \times 360 / 1.25$$

$$N_{u,Rd} = 49766 \text{ N} = 49,8 \text{ kN}$$

L'effort tranchant V_{sd} est appliqué à la double cornière, on doit vérifier la relation ci-dessous :

$$N_{t,Rd} = \frac{V_{sd}}{2} \leq \min[N_{Pl,Rd} ; N_{u,Rd} ; N_{net,Rd}] \quad \text{0,25 pt}$$

$$70/2 = 35 \text{ kN} < 49,8 \text{ kN}$$

Pas de rupture des cornières en traction

0,25 pt

1.2. Vérification de la résistance des boulons**1.2.1. Vérification des boulons « Cornières-Poutres »**

Les boulons sont sollicités au cisaillement. On doit vérifier la relation :

Résistance des boulons au cisaillement par plan de cisaillement « $F_{v,Rd}$ »

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}}$$

Avec :

α_v : = 0.6 pour les boulons de classe « 8.8 »

f_{ub} : limite élastique du boulon

A_s : aire de la section résistante en traction de la partie filetée de la vis quand le plan de cisaillement passe par cette dernière.

$\gamma_{Mb} = 1.25$

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \times 800 \times 245}{1.25} = 94080 \text{ N} = 94,1 \text{ kN}$$

0,25 pt

L'effort tranchant V_{Sd} sollicite 2 boulons sur 2 plans de cisaillement

On doit vérifier :

$$\frac{V_{Sd}}{2 \times 2} \leq F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}}$$

0,25 pt

$$\frac{70}{2 \times 2} \leq F_{v,Rd} = 94,1 \text{ kN}$$

$$14,5 \text{ kN} \leq F_{v,Rd} = 94,1 \text{ kN}$$

0,25 pt

Pas de rupture des boulons « cornières-poutre » par cisaillement

0,25 pt

1.2.2. Vérification des boulons « Cornières-Poteau »

Dans ce cas d'exemple, on néglige l'effet de l'excentricité de l'effort V_{Sd} par rapport à la file des boulons dans le poteau. Ce qui revient à négliger le moment.

0,25 pt

Comme dans le paragraphe 1.2.1, la résistance des boulons au cisaillement par plan de cisaillement « $F_{v,Rd}$ » est donnée par la formule « $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}}$ » est égale à « $F_{v,Rd} = 94,1 \text{ kN}$ »

0,25 pt

L'effort appliqué au boulon d'une file et d'une rangée est égale :

$$\frac{V_{Sd}}{4 \times 1} \text{ (4 boulons et un plan de cisaillement)}$$

0,25 pt

$$\frac{V_{Sd}}{4 \times 1} = 17,4 \text{ kN} \leq F_{v,Rd} = 94,1 \text{ kN}$$

Pas de rupture des boulons « cornières-poteau » par cisaillement

0,25 pt

2. Vérification de la résistance des cornières et des boulons

La cornière coté poutre est soudée à cette dernière par un cordon latéral et deux cordons frontaux. Dans ce cas, on peut utiliser la formule enveloppe qui nous met en sécurité et aussi pour sa simplicité d'emplois.

La formule enveloppe est donnée par :

$$a \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \frac{N \cdot \sqrt{3}}{f_u}$$

0,5 pt

Avec $a = 5 \text{ mm}$ et $N = V_{Sd} = 70 \text{ kN}$

$$\sum l = 2 \times [160 + 2 \times (75 - 15)] = 560 \text{ mm}$$

2 soudures de part et d'autre de l'âme de la poutre

0,5 pt

$$a \sum l = 2800 \text{ mm}^2 \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \frac{V_{sd} \cdot \sqrt{3}}{f_u} = \frac{0.8 \times 1.25 \times 70 \cdot 10^3 \times \sqrt{3}}{360} = 336 \text{ mm}^2 \quad 0,5 \text{ pt}$$

Pas de rupture des soudures « cornières-poutre » 0,5 pt

3. Analyse des deux cas « assemblage par boulons » et « assemblage par soudure » au niveau de la poutre

- D'une manière générale, l'assemblage boulonné ou soudé résiste à la sollicitation. 0,5 pt
- De même, on a un surdimensionnement de l'assemblage par boulons et soudures. 0,25 pt
- ✓ Dans le cas des soudures, la surface résistante représente plus de 8 fois (8,7) celle de la surface minimum. Il serait judicieux de réduire l'épaisseur de la gorge du cordon de soudure ou réduire le nombre de cordons. 0,5 pt
- ✓ Dans le cas des boulons, la résistance des boulons représente 6 à 5 fois la sollicitation (coté poteau et coté poutre). Il faudrait réduire la nuance des boulons ou leur diamètre sans pour autant réduire leur nombre. 0,5 pt
- Il faut aussi se pencher sur un calcul des boulons « coté poteau » avec effet du moment dû à l'excentricité de l'effort V_{sd} pour un calcul précis et juste. 0,25 pt

4. Vérification de la résistance des boulons dans le cas où ils sont précontraints

4.1. Calcul de l'effort de précontrainte

L'effort de précontrainte dans un boulon **H.R. M20** de classe **8.8** est donné par la formule ci-dessous :

$$F_{p,Cd} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s \quad 0,25 \text{ pt}$$

$$F_{p,Cd} = 0,7 \times 800 \times 245 = 137200 \text{ N} = 137,2 \text{ kN} \quad 0,25 \text{ pt}$$

4.2. Vérification des boulons « Cornières-Poutres »

La résistance des boulons au glissement à l'E.L.S. « $F_{s,Rd,ser}$ »

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{Ms,ser}} \cdot F_{p,Cd} \quad 0,25 \text{ pt}$$

k_s : Facteur de forme. Les trous dans la poutre et poteau sont normaux ($k_s = 1$), 0,25 pt

n : Nombre d'interfaces de frottement. Pour 2 cornières sur l'âme de la poutre, on a 2 interfaces en frottement ($n = 2$), 0,25 pt

μ : Coefficient de frottement entre les pièces assemblées. Classe des surfaces B « Peinture au silicate alcali-zinc appliquée après grenailage ou sablage », ($\mu = 0,4$).

$$\gamma_{Ms,ser} = 1,10$$

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{Ms,ser}} \cdot F_{p,Cd} = \frac{1 \times 2 \times 0,4}{1,10} \times 137,2 = 99,78 \text{ kN} \quad 0,25 \text{ pt}$$

$$\frac{V_{sd}}{2} = 29 \text{ kN} \leq F_{s,Rd,ser} = 99,78 \text{ kN} \quad 0,25 \text{ pt}$$

Pas de glissement de la cornière sur l'âme de la poutre. 0,25 pt

4.3. Vérification des boulons « Cornières-Poteau »

Nous avons dans cette partie de l'assemblage 4 boulons et un plan de glissement par boulon.

L'effort sollicitant un boulon est :

$$\frac{V_{Sd}}{4 \times 1} = 17,5 \text{ kN} \quad 0,5 \text{ pt}$$

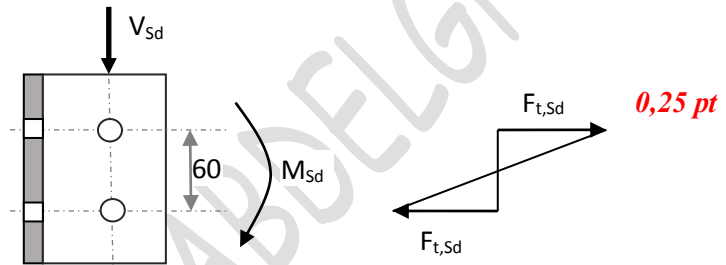
L'effort résistant est :

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{Ms,ser}} \cdot F_p \cdot C_d = \frac{1 \times 1 \times 0,4}{1,10} \times 137,2 = 49,89 \text{ kN} \quad 0,5 \text{ pt}$$

$$F_{s,Rd,ser} = 49,89 \text{ kN} \text{ est } > \text{ à la sollicitation } = 17,5 \text{ kN} \quad 0,5 \text{ pt}$$

Pas de glissement de la cornière sur l'âme du poteau. 0,5 pt

5. Vérification de l'assemblage par boulons ordinaires et sollicité par un effort tranchant « V_{Sd} » et un moment de flexion « M_{Sd} ». Calculs dans le cas d'une distribution élastique des efforts

5.1. Vérification des boulons « Cornières-Poutre »

Le boulon est sollicité par 2 efforts de cisaillement « $\frac{V_{Sd}}{2}$ » et $F_{t,Sd} = \frac{M_{Sd}}{60}$ 0,25 pt

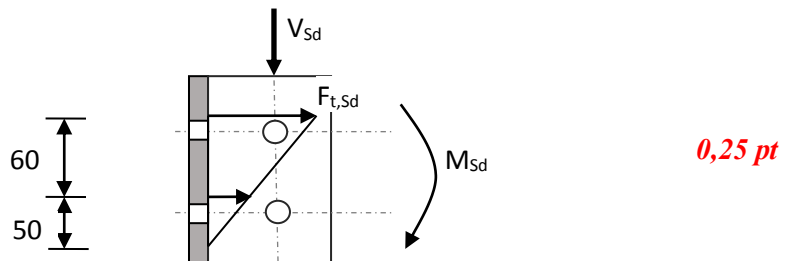
La résistance du boulon au cisaillement est donnée par la formule :

$$F_{v,Sd} = \left[\left(\frac{M_{Sd}}{60} \right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{2} \right)^2 \right]^{0,5} \quad 0,25 \text{ pt}$$

$$F_{v,Sd} = \left[\left(\frac{60}{60 \cdot 10^{-3}} \right)^2 + \left(\frac{70}{2} \right)^2 \right]^{0,5} = 1000 \text{ kN} \quad 0,25 \text{ pt}$$

$$F_{v,Sd} = 1000 \text{ kN} > F_{v,Rd} = 94,1 \text{ kN} \quad 0,25 \text{ pt}$$

Rupture des boulons par cisaillement 0,25 pt

5.2. Vérification des boulons « Cornières-Poteau »

Dans cette configuration, les boulons sont sollicités simultanément au cisaillement et à la traction. Le boulon, le plus sollicité est celui de la 1^{ère} rangée. 0,25 pt

On doit vérifier l'inéquation ci-dessous :

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1.4 F_{t,Rd}} \leq 1$$

0,25 pt

$F_{v,Sd}$: effort de cisaillement = $V_{Sd}/4=17,5$ kN car on a 4 boulons ;

$F_{t,Sd}$: effort de traction dans le boulon = $[M_{Sd}/(60+50)]/2=272.7$ kN. On a le chiffre 2 en dénominateur car on a deux boulons dans la 1^{ère} rangée ;

0,25 pt

$F_{v,Rd}$: effort résistant de cisaillement « $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}}$ » est égale à « $F_{v,Rd} = 94,1$ kN ;

0,25 pt

$F_{t,Rd}$: effort de traction dans le boulon. Il est donné par la formule ci-dessous :

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

f_{ub} : limite élastique du boulon = 800 MPa

A_s : aire de la section filetée = 245 mm²

$\gamma_{Mb} = 1.50$ suivant le règlement CCM97 ($\gamma_{Mb} = 1.25$ selon EC3)

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \times 800 \times 245}{1.50} = 117600 \text{ N} = 117,6 \text{ kN}$$

0,25 pt

Alors,

$$\frac{17,5}{94,1} + \frac{272,7}{1.4 \times 117,6} \leq 1$$

0,25 pt

1.85 < 1 Rupture des boulons

0,25 pt

On est tenu à vérifier les 3 autres conditions, à savoir :

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1.4 F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\checkmark \frac{F_{t,Sd}}{B_{p,Rd}} \leq 1 \quad \text{Traction avec le poinçonnement}$$

$$\checkmark \frac{F_{v,Sd}}{F_{b,Rd}} \leq 1 \quad \text{Cisaillement avec la pression diamétrale, voir 1.1.1.2}$$

$$\checkmark \frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}} \leq 1 \quad \text{vérification à la traction des boulons}$$

0,25 pt

Ces trois vérifications ne seront pas fait il y a déjà rupture des boulons.