

EXERCICE BAT3&4: POUTRE MIXTE ET CONNEXION - CORRIGÉ

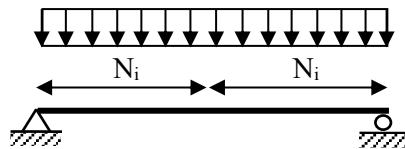
Problème 1, question 1.1

Calcul de la connexion totale

Calcul EP, donc dimensionnement plastique de la connexion.

Effort rasant transmis sur un tronçon de longueur entre appui ($M = 0$) et M_{\max} , donc :

Pour une poutre simple et une charge uniformément répartie, le champ de cisaillement (longueur critique) correspond à un tronçon de longueur entre appui ($M = 0$) et M_{\max} , soit la demi-travée : $L_i = L/2 = 5000 \text{ mm}$



Effort rasant :

Comme l'axe neutre de la section mixte se situe dans la dalle, l'effort rasant à transmettre correspond à la plastification de la section d'acier :

$$F_{vi,Ed} = N_{a,Rd} = 1401 \text{ kN}$$

Résistance d'un goujon de 16 mm dans C 25/30 : (SIA 264 § 6.1.2)

Connecteur souple, oui car standard (facult., contrôle : $h_D / d = 75\text{mm} / 16\text{mm} = 4.7 > 4$ OK)

En utilisant $E_{cm}, f_{ub} = 450 \text{ MPa}$, on trouve $P_{c,Rd} = 55.1 \text{ kN}$, et $P_{D,Rd} = 57.9 \text{ kN}$

(avec la SZS C5 : 2018, p. 89, on a directement : $P_{Rd} = 53.5 \text{ kN}$, mais k_E utilisé un peu différent)

Réduction due à la tôle profilée :

$$\alpha_t = \frac{0.70}{\sqrt{N_r}} \frac{b_0}{h_p} \left(\frac{h_D}{h_p} - 1 \right) \leq \alpha_{t,lim}$$

Dans notre cas, la tôle est interrompue, voir figure de la donnée, donc les goujons à tête sont soudés directement sur le profilé métallique, on a, pour $N_r = 1$, $\alpha_{t,lim} = 0.75$

$$\alpha_t = \frac{0.70}{\sqrt{1}} \frac{102.5 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} \left(\frac{75 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} - 1 \right) = 1.57 > \alpha_{t,lim} \text{ donc } \alpha_t = 0.75$$

Nb de goujons N_i :

$$\text{Le nombre de goujons nécessaire sur } L_i \text{ est : } N_{i,nec} = \frac{F_{vi,Ed}}{\alpha_t \cdot P_{Rd}} = \frac{1401 \cdot kN}{0.75 \cdot 55.1 kN} = 33.9 \Rightarrow N_i = 34 \text{ goujons.}$$

Note : avec $P_{Rd} = 53.5 \text{ kN}$, on obtient plus, 34.9, et sans compter α_t on trouve moins, soit 26.2.

Répartition des goujons (C5 p. 81 ou SIA 264 §7.1)

$$e_2 \geq 3.5 \cdot d_D = 56 \text{ mm}$$

$$5 \cdot d = 80 \text{ mm} \leq e_1 \leq 6 \cdot h = 600 \text{ mm} \leq 800 \text{ mm}$$

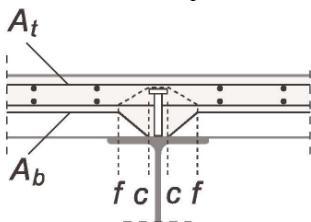
34 goujons sur 5000 mm donne $e_1 \leq 147 \text{ mm}$, $b_{nervure} = 150 \text{ mm}$ donc pas bon. Il faudrait encore optimiser (ép. dalle, etc. ou mettre 2 rangées près des appuis).

Autre choix possible: deux rangées de goujons, $e_1 = 296 \text{ mm}$ (Attention : on devrait alors recalculer avec $\alpha_t = 0.6$).

Problème 1, question 1.2

Cisaillement longitudinal :

Il faut vérifier 2 plans, c-c et f-f (voir fig. 3 de la SIA 264) :



Effort rasant/mm entre poutre et dalle :

$$\nu_{Ed} = \frac{F_{vi,Ed}}{L_i} = \frac{1401 \cdot 10^3}{5000} = 280.2 \text{ N/mm}$$

1) Vérification selon le plan c-c. Cette vérification n'est pas nécessaire dans notre cas selon SIA 264 § 5.1.4.3, car nous avons tenu compte de α_t pour la détermination du nb de goujons. Ceci signifie que le cône de rupture et donc le cisaillement longitudinal ne va pas se produire selon ce plan.

2) Vérification selon le plan f-f

L'effort rasant/mm reste inchangé pour ce plan.

Résistance au cisaillement longi/mm :

Contribution de l'armature transversale : Hyp. : angle de la bielle de compression 30°

Barre diamètre 4 mm : $A_e = 2A_b = 25.2 \text{ mm}^2$

$$\nu_{Rd} = \frac{A_e}{S_f} f_{sd} \cot 30^\circ = \frac{25.2 \text{ mm}^2}{100 \text{ mm}} \frac{100 \text{ N/mm}^2}{1.15} \cot 30^\circ = 190 \frac{\text{N}}{\text{mm}} < \nu_{Rd,lim} ?$$

$\nu_{Rd,lim}$: contrôle par rapport à la limite de rupture de la bielle de compression (ou plutôt des bielles vu les plans c-c-et f-f). Pas à vérifier car plus favorable que selon plan c-c. Mais comme on n'a pas vérifié ce dernier, on le contrôle maintenant.

L_c = longueur de la surface potentielle de rupture = $2 \cdot h_D + d_k = 2 \cdot 75 + 32 = 182 \text{ mm}$
(d_k : diamètre tête goujon)

$$\nu_{Rd,lim} = k_c f_{cd} L_c \sin \Theta_f \cos \Theta_f = 0.6 \cdot \frac{25 \text{ N/mm}^2}{1.5} 182 \text{ mm} \cdot \sin 30^\circ \cdot \cos 30^\circ \\ = 788 \text{ N/mm} > 190 \text{ N/mm}$$

OK, c'est bien la barre qui est critique.

Contribution de la tôle profilée ? Aucune contribution car interrompue sur la solive.

Donc $\nu_{Ed,f-f} = 280.2 \text{ N/mm} > 190 \text{ N/mm} \rightarrow \text{KO}$

Il faut augmenter le treillis et prendre du diamètre 5 mm. On trouve alors $\nu_{Rd} = 296 \text{ N/mm}$ et les autres contrôles ne changent pas $\rightarrow \text{OK}$

Problème 1, question 1.3

Calcul de la connexion partielle

Applicable ? Poutres mixtes de bâtiment sous M+, connecteurs ductiles OK

$$\frac{N}{N_f} \geq 1 - \frac{355 \text{ N/mm}^2}{f_y} (0.75 \text{ m} - 0.03 L_e) \geq 0.4 \quad \text{pour } L_e \leq 25 \text{ m}$$

$$\frac{N}{N_f} \geq 1 \quad \text{pour } L_e > 25 \text{ m}$$

$$N/N_f = 1 - 355/235 \cdot (0.75 - 0.03 \cdot 10) = 0.32 < 0.4 ! \quad \text{La condition limite de min. 40\% s'applique}$$

$$M_{pl,a,Rd} = 180 \text{ kNm (S235 C5)}$$

$$N_{part,nec} = \frac{\frac{M_{Ed}}{M_{pl,a}} - \frac{\gamma_a}{\gamma_a}}{\frac{M_{pl,b}}{\gamma_a} - \frac{M_{pl,a}}{\gamma_a}} N_{tot} = \frac{269.2 - 180}{336.6 - 180} 33.9 = 19.3 \Rightarrow 20 \text{ goujons sur } 5000 \text{ mm (demi-portée).}$$

$$\frac{N_{part,nec}}{N_{tot}} = \frac{20}{34} = 0.59 \geq 0.4 \text{ OK}$$

Cette méthode apporte une réduction importante du nombre de goujons de 41 % !

Et elle permet de diminuer également le cisaillement longitudinal dans la même proportion, soit env. 40%, et donc plus besoin d'adapter le diamètre du treillis ($v_{Ed,c-c} = 168.1 \text{ N/mm} < 190 \text{ N/mm OK}$).

Problème 2, question 2.1

Calcul de la connexion totale

- Efforts rasants

L'axe neutre étant dans le profilé métallique, on obtient les valeurs de calcul suivantes des efforts rasants

$$F_{v,Ed}^+ = N_{c,Rd} = \frac{0.85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} A_c = \frac{0.85 \cdot 25 \text{ N/mm}^2}{1.5} \cdot 110 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 \\ = 1560 \cdot 10^3 \text{ N} = 1560 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed}^- = N_{s,Rd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} A_s = \frac{500 \text{ N/mm}^2}{1.15} \cdot 295 \text{ mm}^2 = 128 \cdot 10^3 \text{ N} = 128 \text{ kN}$$

- Résistance d'un goujon $d_D = 16 \text{ mm}$, $h_D = 75 \text{ mm}$

- Ecrasement du béton :

$$P_{c,Rd} = \frac{0.29 d_D^2}{\gamma_v} \sqrt{f_{ck} E_{cm}} = \frac{0.29 (16 \text{ mm})^2}{1.25} \sqrt{25 \text{ N/mm}^2 \cdot 34400 \text{ N/mm}^2} \\ = 55.1 \cdot 10^3 \text{ N} = 55.1 \text{ kN}$$

- Rupture du goujon :

$$P_{D,Rd} = \frac{0.8 f_{u,D} \pi d_D^2}{\gamma_v} = \frac{0.8 \cdot 450 \text{ N/mm}^2}{1.25} \cdot \frac{\pi (16 \text{ mm})^2}{4} = 57.9 \cdot 10^3 \text{ N} = 57.9 \text{ kN}$$

- Coefficient de réduction du à la tôle profilée (nervures parallèles au sommier) :

$$\alpha_l = 0.60 \frac{b_0}{h_p} \left(\frac{h_D}{h_p} - 1 \right) \leq 1.0 \\ = 0.60 \frac{102.5 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} \left(\frac{75 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} - 1 \right) = 1.35 > 1.0 \Rightarrow \alpha_l = 1.0$$

La valeur de calcul de la résistance au cisaillement d'un goujon vaut donc $P_{Rd} = P_{c,Rd} = 55.1 \text{ kN}$

- Nombre de goujons (connexion totale)

- Le nombre de goujons pour chaque l_i s'élève à :

$$N^+ = \frac{F_{v,Ed}^+}{P_{Rd}} = \frac{1560 \text{ kN}}{55.1 \text{ kN}} = 28.3 \Rightarrow 29 \text{ goujons}$$

$$N^- = \frac{F_{v,Ed}^-}{P_{Rd}} = \frac{128 \text{ kN}}{55.1 \text{ kN}} = 2.3 \Rightarrow 3 \text{ goujons}$$

Travées de rive : $N_{tot} = 2N^+ + N^- = 2 \cdot 29 + 3 = 61$ goujons

Travée centrale: $N_{tot} = 2N^+ + 2N^- = 2 \cdot 29 + 2 \cdot 3 = 64$ goujons

Note : L'ancre des zones d'extrémité pour tenir compte des efforts de retrait n'a en général pas à être considéré car il agit en sens opposé à celui des efforts gravitaires (i.e. il réduit l'effort rasant appliqué).

- Répartition des goujons (fig. 2.1) selon éq. ci-dessus

Espace minimal entre les goujons : $5 d_D = 5 \cdot 16 \text{ mm} = 80 \text{ mm}$

Espace maximal : 800 mm ou $6 h_c = 6 \cdot 100 \text{ mm} = 600 \text{ mm}$

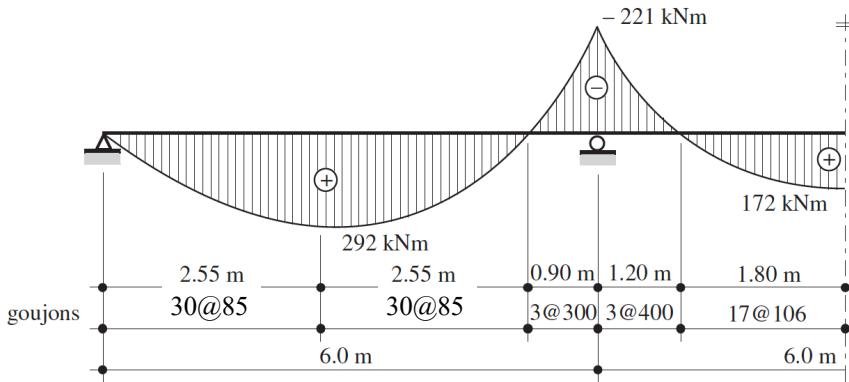


Figure 2.1 : Diagramme des moments redistribués et répartition des goujons

Note : pour la zone centrale, on a pas besoin d'une connexion totale, on peut facilement descendre à une connexion partielle de 60%. Le moment résistant sera alors de :

$$M_{Rd}^+ = M_{pl,a,Rd} + (M_{pl,Rd} - M_{pl,a,Rd}) \frac{N}{N_f} = 248 \text{ kNm} + (383 \text{ kNm} - 248) \cdot 0.6 = 330 \text{ kNm}$$

Ce qui est largement suffisant ($M_{Ed} = 172 \text{ kNm}$).

$$\text{Le nb de goujons vaudra alors : } N^+ = \frac{F_{v,Ed}^+}{P_{Rd}} = 0.6 \frac{1560 \text{ kN}}{55.1 \text{ kN}} = 17.0 \Rightarrow 17 \text{ goujons}$$

Problème 2, question 2.2

Cisaillement longitudinal

- Valeur de calcul de l'effort rasant plastique
 - Dans la zone des moments positifs, la travée centrale est déterminante :

$$v_{Ed}^+ = \frac{N}{N_f} \cdot \frac{F_{v,Ed}^+}{l_2^+} = 0.6 \cdot \frac{1560 \cdot 10^3 \text{ N}}{1800 \text{ mm}} = 520 \text{ N/mm}$$

- Dans la zone des moments négatifs, la travée de rive est déterminante :

$$v_{Ed}^- = \frac{F_{v,Ed}^-}{l_1^-} = \frac{128 \cdot 10^3 \text{ N}}{900 \text{ mm}} = 142 \text{ N/mm}$$

- Effort rasant par unité de longueur et par plan g-g
 - Moments positifs :

$$v_{Ed(g-g)}^+ = v_{Ed}^+ \frac{b_{eff,1} - b}{2b_{eff,1}} = 520 \text{ N/mm} \cdot \frac{1275 \text{ mm} - 280 \text{ mm}}{2 \cdot 1275 \text{ mm}} = 203 \text{ N/mm}$$

- Moments négatifs :

$$v_{Ed(g-g)}^- = v_{Ed}^- \frac{b_{eff,2} - b}{2b_{eff,2}} = 142 \text{ N/mm} \cdot \frac{750 \text{ mm} - 280 \text{ mm}}{2 \cdot 750 \text{ mm}} = 44.5 \text{ N/mm}$$

- Résistance au cisaillement longitudinal par unité de longueur

- Contribution de l'armature transversale de diamètre 6 mm, $s_f = 100 \text{ mm}$:

$$v_{Rd} = \frac{A_e}{s_f} f_{sd} \cot \Theta_f = \frac{28.3 \text{ mm}^2}{100 \text{ mm}} \cdot \frac{500 \text{ N/mm}^2}{1.15} \cdot \cot 30^\circ = 213 \text{ N/mm}$$

avec

$$A_e = \frac{\pi \phi^2}{4} = \frac{\pi (6 \text{ mm})^2}{4} = 28.3 \text{ mm}^2$$

$$\Theta_f = 30^\circ \text{ (choix)}$$

- Limite due à la rupture de la bielle de compression :

$$\nu_{Rd,lim} \leq k_c f_{cd} L_c \sin \Theta_f \cos \Theta_f = 0.6 \cdot \frac{25 \text{ N/mm}^2}{1.5} \cdot 60 \text{ mm} \cdot \sin 30^\circ \cdot \cos 30^\circ = 259.8 \text{ N/mm}$$

avec $k_c = 0.6$

$L_e = h_c = 60 \text{ mm}$ (plan g-g)

La valeur de calcul de la résistance au cisaillement longitudinal vaut donc $\nu_{Rd} = 213 \text{ N/mm}$ puisque $\nu_{Rd} = 213 \text{ N/mm} < \nu_{Rd,lim} = 259.8 \text{ N/mm}$.

- Vérifications (section g-g)

- Moments positifs :

$$\nu_{Ed}^+ = 203 \text{ N/mm} < \nu_{Rd} = 213 \text{ N/mm} \quad \text{OK}$$

- Moments négatifs :

$$\nu_{Ed}^- = 44.5 \text{ N/mm} < \nu_{Rd} = 213 \text{ N/mm} \quad \text{OK}$$