



Poutres mixtes

Partie c

(réfs. TGC 10 § 5.8.6 et
TGC 11 § 10.5.5)

Prof. A. Nussbaumer
RESSLab

- Connexion
- Cisaillement longitudinal
- Connexion partielle
- Annexes

- Deux types de connexion:

totale ou partielle

La résistance ultime de la poutre mixte n'est pas limitée par la résistance de la connexion.

- obligatoire pour les ponts
- souvent utilisée dans les bâtiments

La résistance ultime de la poutre mixte est limitée par la résistance de la connexion.

- uniquement dans les bâtiments
- seulement si la résistance de la section de poutre est déterminée par un calcul plastique
- le connecteur doit être souple

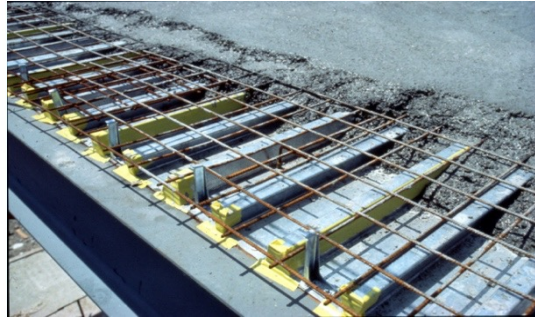
Principe du dimensionnement de la connexion

1. Calculer l'effort de cisaillement horizontal sollicitant l'interface acier-béton et à reprendre par les connecteurs
2. Calculer la résistance au cisaillement d'un connecteur
3. Déterminer le nombre de connecteurs nécessaire par un calcul élastique ou plastique, suivant l'analyse adoptée pour la résistance de la section mixte
4. Disposer les connecteurs sur la surface de la semelle de la poutre métallique en respectant certains critères géométriques

Rappel: Types de connecteurs



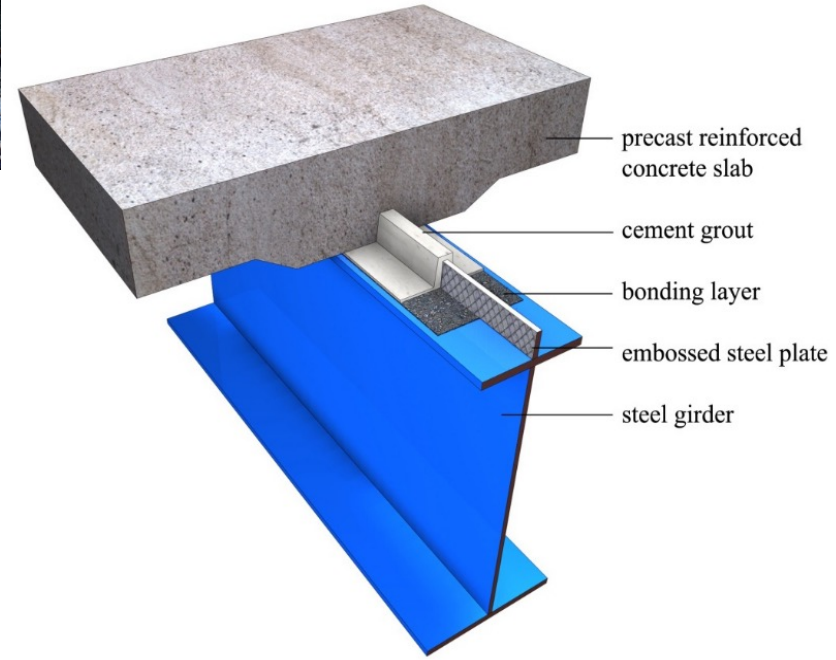
Goujons à tête



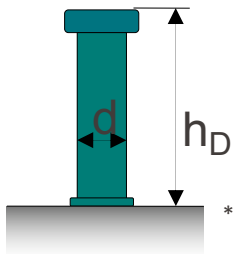
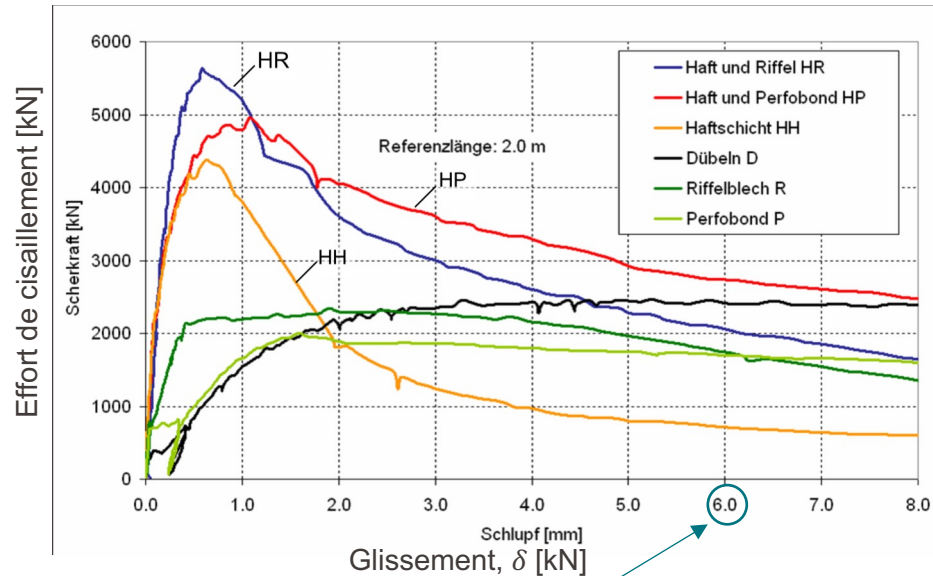
goujons Hilti



Tôles Perfobond



Résistance de la connexion, essais push-out

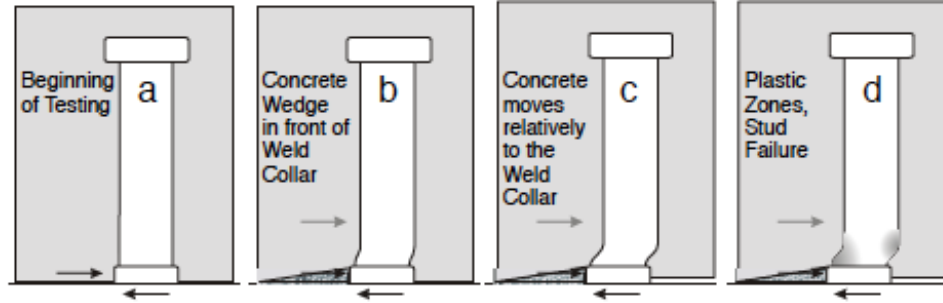


Limite pour connecteurs souples* ↔ goujons: $h_d \geq 4d$

* Pour d'autres types de connecteurs que les goujons, vérifier leur déformabilité $\delta_{uk} \geq 6$ mm par calcul ou essais selon EN 1994-1-1

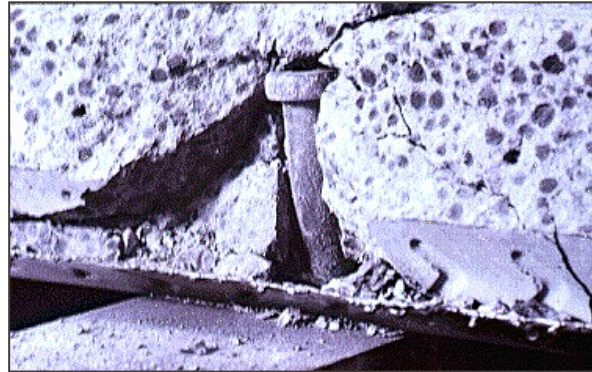


Connexion par goujon à tête, modes de rupture



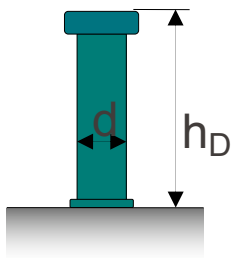
Par plastification en cisaillement de la tige du goujon

Dans soudure ? Non
si exécution +
contrôle corrects



Ecrasement du
béton (provoqué par
la flexion du goujon)

Résistance de la connexion par goujon, valeurs de calcul



- Résistance caractéristique :

$$P_{Rk} = \min(P_{Rk}^1; P_{Rk}^2)$$

$$P_{Rk}^1 = \frac{0.8f_{uD}\pi d^2}{4} \text{ et } P_{Rk}^2 = 0.29d^2\sqrt{f_{ck}E_{cm}}$$

↑
Ruine par
cisaillement de
l'acier en pied
($16 \leq d \leq 25$ mm)

↑
Ruine par
écrasement du
béton en pied
($20 \leq f_{ck} \leq 50$ N/mm²)

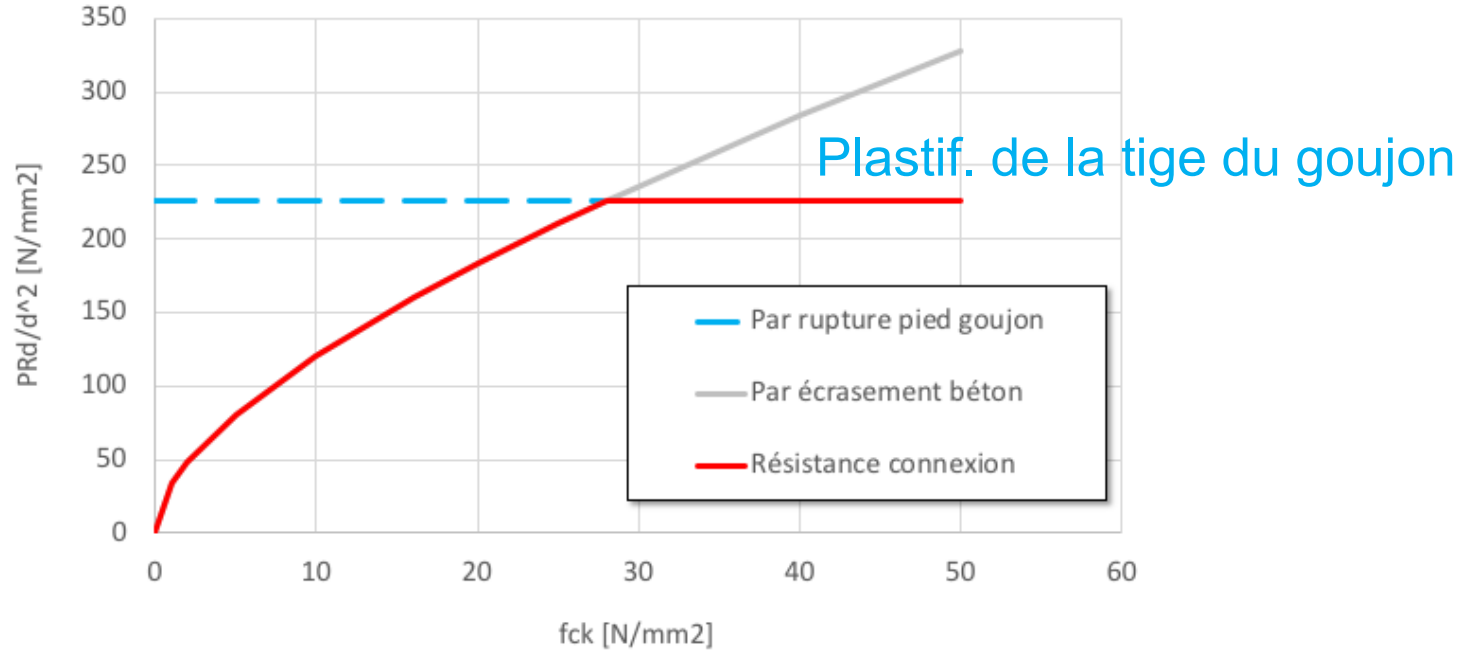
- Résistance ultime de calcul

Calcul plastique $P_{pl,Rd} = \frac{P_{Rk}}{\gamma_V}$ avec $\gamma_V = 1.25$

Calcul élastique $P_{el,Rd} = 0.75 \frac{P_{Rk}}{\gamma_V}$

SIA 264 §6.1.2.1

Résistance de la connexion par goujon, valeurs de calcul



Résistance d'un goujon, valeurs de calcul, $P_{Rd} [kN]$

Bâtiment ->

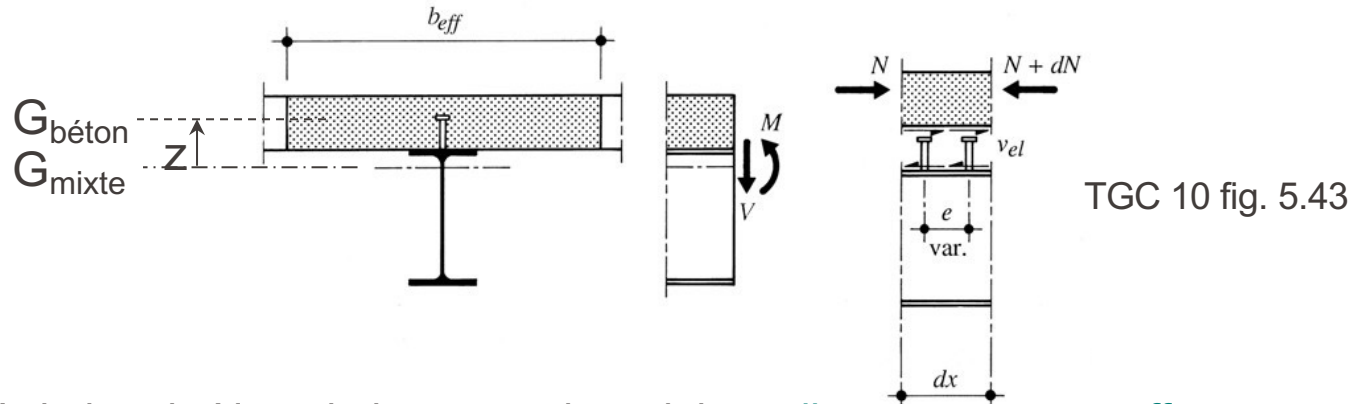
Pont ->

Diamètre du goujon, d	Calcul plastique			Calcul élastique			
	Béton	Béton	Béton	Béton	Béton	Béton	Béton
	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37
13 mm	31 kN	35 kN	38 kN	20 kN	23 kN	27 kN	29 kN
16 mm	47 kN	54 kN	58 kN	30 kN	35 kN	40 kN	43 kN
19 mm	66 kN	76 kN	82 kN	43 kN	49 kN	57 kN	61 kN
22 mm	88 kN	101 kN	109 kN	58 kN	66 kN	76 kN	82 kN

$$(f_{u,D} = 450 \text{ N/mm}^2).$$

Calcul élastique de la connexion (si calcul élastique de la section)

- Dans chaque section transversale d'abscisse x :



Variation de N sur la longueur dx , soit le « glissement » ou « effort rasant » à l'interface :

$$v_{el,Ed}(x) = \frac{S_{béton}}{n_{el}I_{mixte}} V_{Ed}(x)$$

$$v_{el,Ed}(x) = \sum \frac{S_{c,i}}{n_{el,i}I_{b,i}} V_{Ed,i}(x)$$

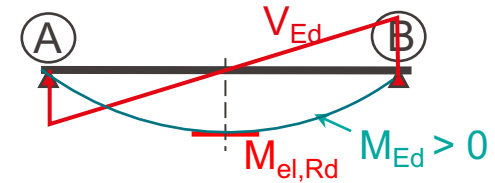
$v_{Ed,i}(x)$ provenant des actions agissant sur le mixte !! (après réalisation de la connexion)

Calcul élastique de la connexion

Détermination du nombre de connecteurs N_{connect} (par ex. par m)

$$N_{\text{connect}} = \frac{E_d}{R_d} = \frac{v_{el,Ed}(x) dx}{P_{el,Rd}}$$

Résistance d'un connecteur



- Le nombre de connecteurs se traduit par un espacement longitudinal entre les rangées transversales.
- $v_{el,Ed}(x)$ varie le long de la poutre (avec l'effort tranchant) donc le nombre/m, ou l'espacement longitudinal entre connecteurs, e_1 , aussi.
- Nombre de connecteurs par rangée:

$$n_{\text{connect}} = \frac{v_{el,Ed}(x)}{P_{el,Rd}} e_1$$

Typiquement: $150 < e_1 < 400 \text{ mm}$

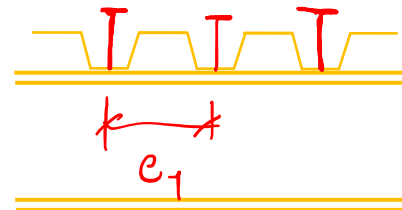
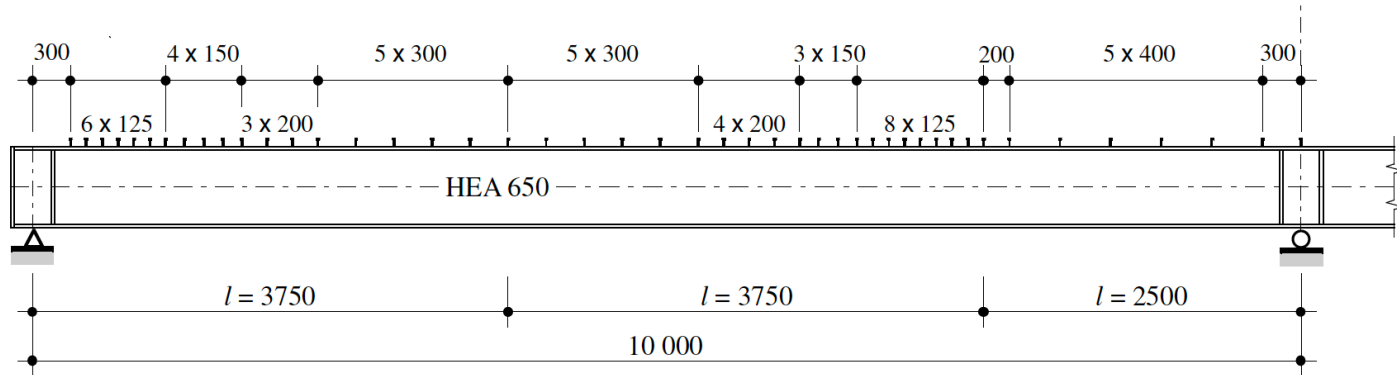
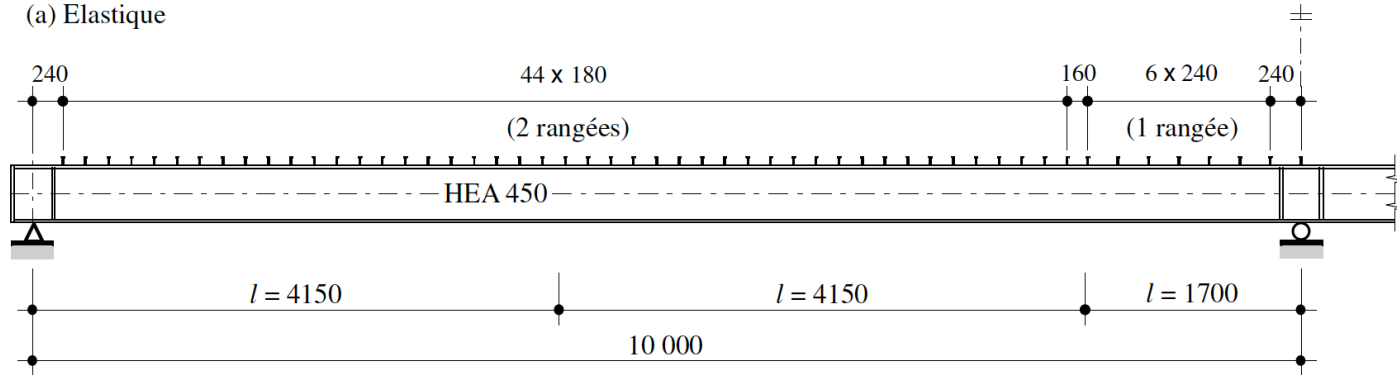


Fig. 10.45 exemple répartition connecteurs



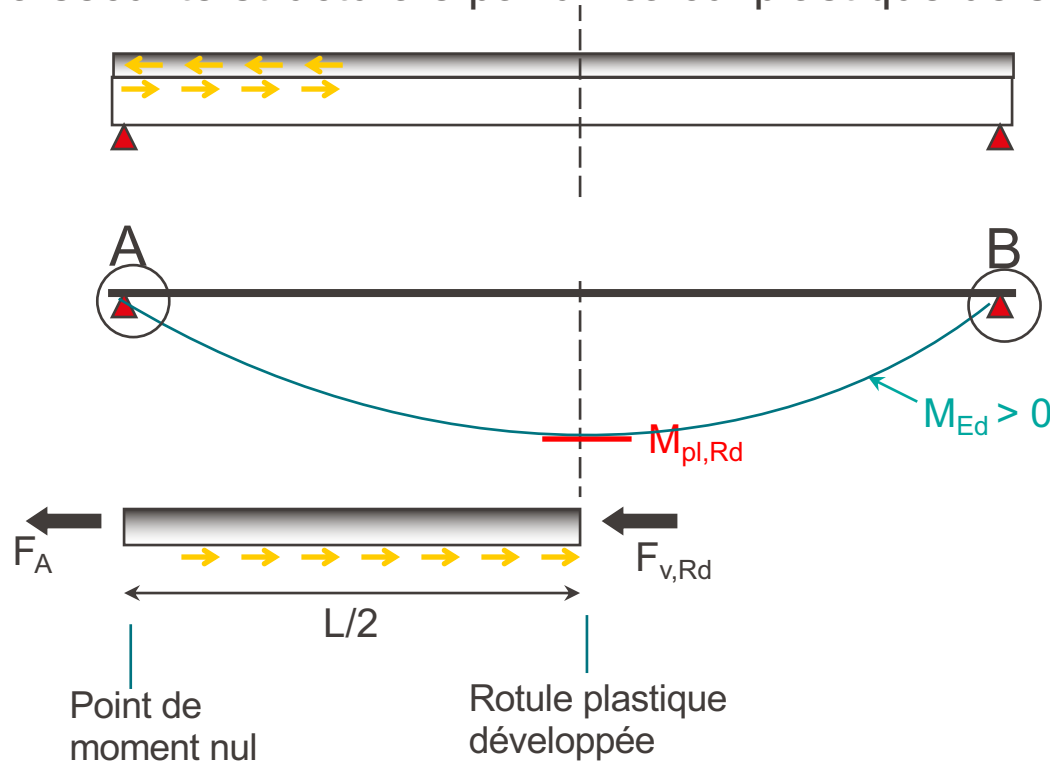
(a) Elastique



(b) Plastique

Calcul plastique de la connexion

Valable pour les poutres avec une section de classe 1 ou 2, justifiée pour la sécurité structurale par un calcul plastique de section ($M_{Ed} \leq M_{pl,Rd}$)



Equilibre du bloc béton entre A et mi-travée (longueur critique) en supposant $M_{Ed} = M_{pl,Rd}$ dans la section à mi-travée

Calcul plastique de la connexion

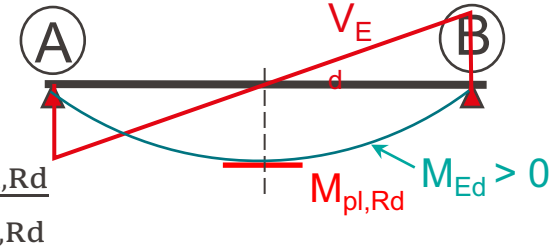
- Au point de moment nul (c'est-à-dire sur appui pour une poutre simple)

$$F_A = 0 \text{ (ou } F_B = 0)$$

- Equilibre du bloc béton

$$F_{V,Rd} - F_A = F_{V,Rd} \leq v_{pl,Rd} \cdot \frac{L}{2} \quad \text{d'où } N_{\text{connect}} \geq \frac{F_{V,i,Rd}}{P_{pl,Rd}}$$

avec N_{connect} à répartir sur la longueur du bloc béton ($L/2$)



- Résistance en travée

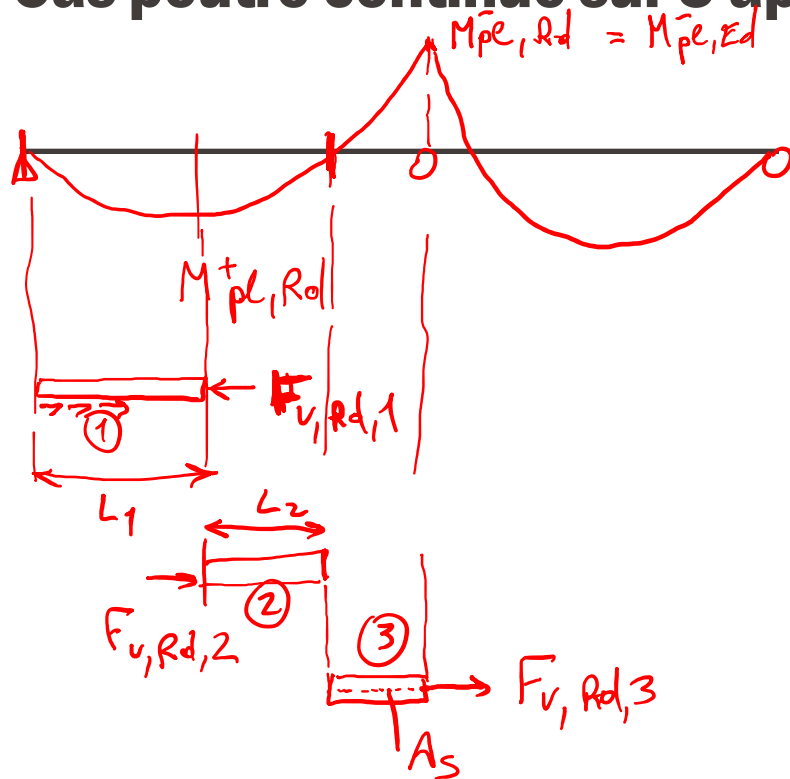
$$F_{V,i,Rd} = \frac{0.85 f_{ck}}{\gamma_c} b_{\text{eff}} h_c$$

si l'ANP est dans le profilé

$$F_{V,i,Rd} = \frac{0.85 f_{ck}}{\gamma_c} b_{\text{eff}} X = \frac{f_y}{\gamma_{M1}} A_a$$

si l'ANP est dans la dalle

Cas poutre continue sur 3 appuis, plusieurs tronçons



$$(1) \quad N_{com} = \frac{F_{v,Rd,1}}{P_{pl,Rd}} \text{ sur } L_1$$

$$(2) \quad \vdots$$

$$(3) \quad \vdots$$

Calcul Plastique : connecteurs souples ! Goujons :



$$\frac{h_d}{\phi} > 4$$

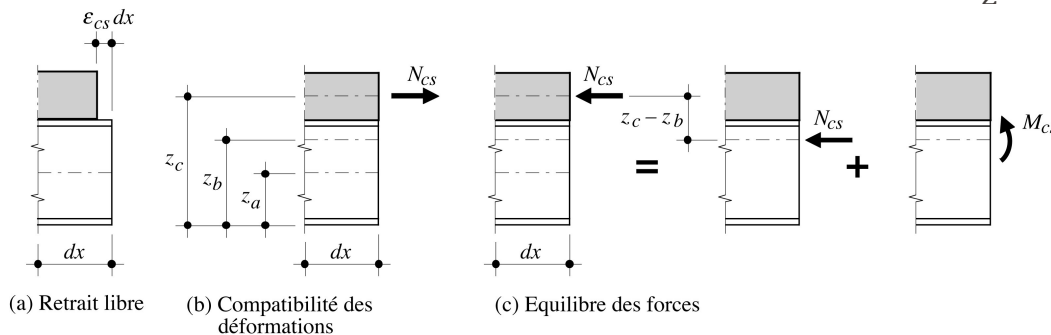
entre un pt $M=0$ et $M = M_{pl,Ed}$

Zones d'extrémités: ancrage pour efforts dus au retrait

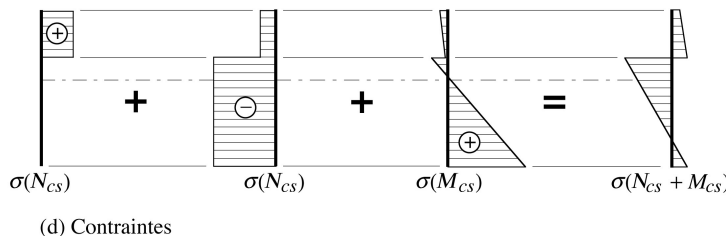
- Bâtiment : $\varepsilon_{cs}(\infty) = 0.5\text{‰}$
- Pont : $\varepsilon_{cs}(\infty) = 0.25\text{‰}$

$$N_{cs,Ed} = \gamma_G \cdot \varepsilon_{cs,\infty} \cdot E_{cs} \cdot A_c$$

$$M_{cs,Ed} = N_{cs,Ed} \cdot \left(h - \frac{h_c}{2} - z_b \right)$$



TGC 10 fig.
5.39



Effort axial d'extrémité
à ancrer F_{vs} :

$$F_{vs} = \sigma_{ag,s} \cdot A_a \text{ ou } \sigma_{c,s} \cdot A_c$$

Zones d'extrémités: ancrage pour efforts dus au retrait

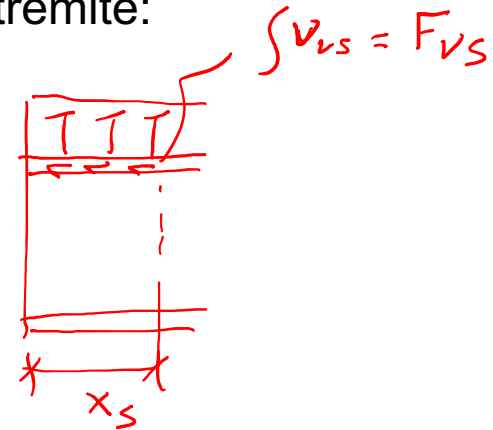
- Voir TGC 11 fig. 10.32, surtout pour ponts
- Effort axial d'extrémité à ancrer F_{vs}

$$F_{vs} = \sigma_{ag,s} \cdot A_a = A_a \left[\frac{N_{cs}}{A_b} + \frac{M_{cs}}{I_b} (z_b - z_a) \right]$$

- Répartition triangulaire de l'effort sur x_s , max à l'extrémité:

$$v_s = \frac{2F_{vs}}{x_s}$$

- Longueur d'introduction $x_s = \min(b_{eff}, \frac{L}{10})$



Dispositions constructives de la connexion, règles de positionnement des goujons SIA 264 §7.1

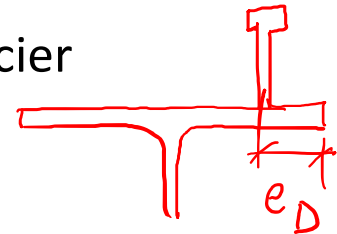
■ Espacement longitudinal des connecteurs

- Minimum: $e_1 \geq 5d$
- Maximum, pour assurer le comportement mixte entre acier et béton: $e_{1,max} = \min(800 \text{ mm}; 6 \text{ fois l'épaisseur de la dalle})$
- Maximum, pour pouvoir affecter une classe 1 ou 2 à la semelle supérieure en acier *comprimée* : $e_{1,max} = 22t_f \sqrt{235/f_y}$

■ Espacement transversal des connecteurs

- Minimum: $e_2 \geq 3,5d$

- Distance nette entre connecteur et bord de la semelle acier *comprimée*, inférieure à : $e_D = 9t_f \sqrt{235/f_y}$

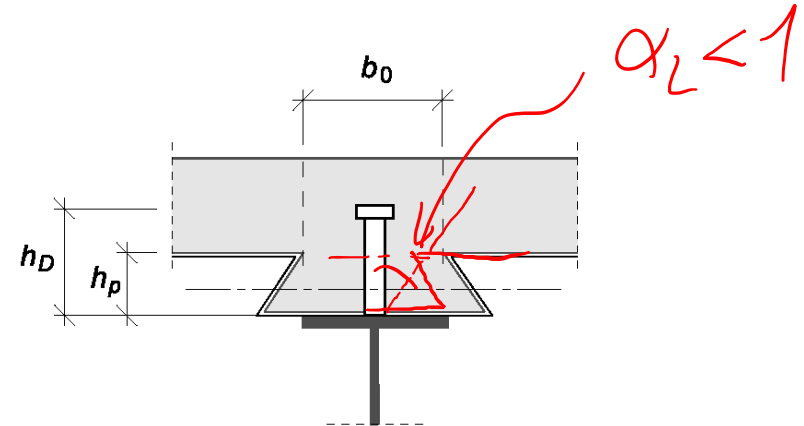
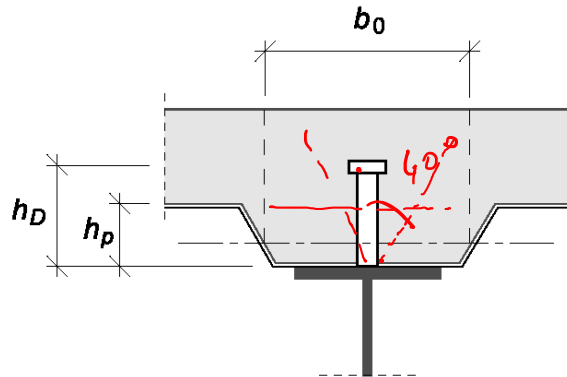


Résistance connexion, particularités (TGC11 §10.5.6)

- Influence de la présence d'une tôle profilée **parallèle** à la poutre:

P_{Rd} doit être multipliée par α_L : $\alpha_L = \frac{0.6b_0}{h_p} \left(\frac{h_D}{h_p} - 1 \right) \leq 1.0$

- Coupes transversales : (TGC 11 fig. 10.39)



Résistance connexion, particularités

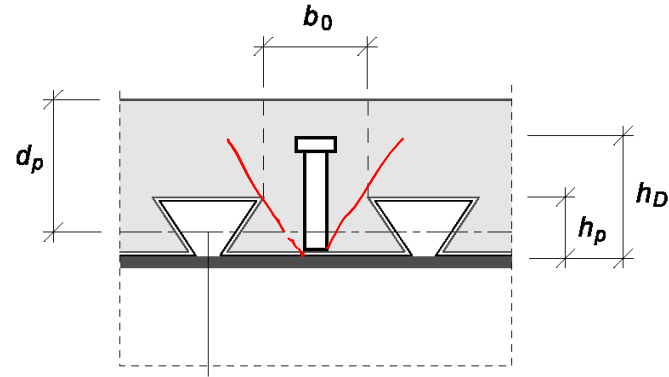
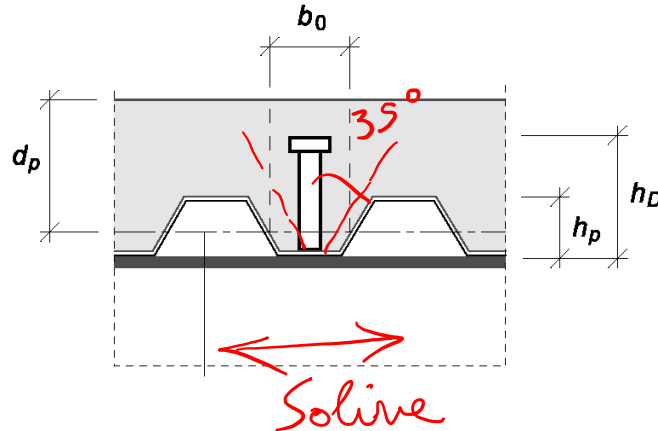
- Influence de la présence d'une tôle profilée **perpendiculaire** à la poutre:

P_{Rd} doit être multipliée par α_t :
$$\alpha_t = \frac{0.7b_0}{\sqrt{N_r}h_p} \left(\frac{h_D}{h_p} - 1 \right)$$

Avec N_r = nombre de goujons par nervure



- Coupes longitudinales : (TGC 11 fig. 10.39)



Cisaillement longitudinal

- Vérification de l'armature transversale traversant les plans cisillés de la dalle :
SIA 264 §5.1.4.8

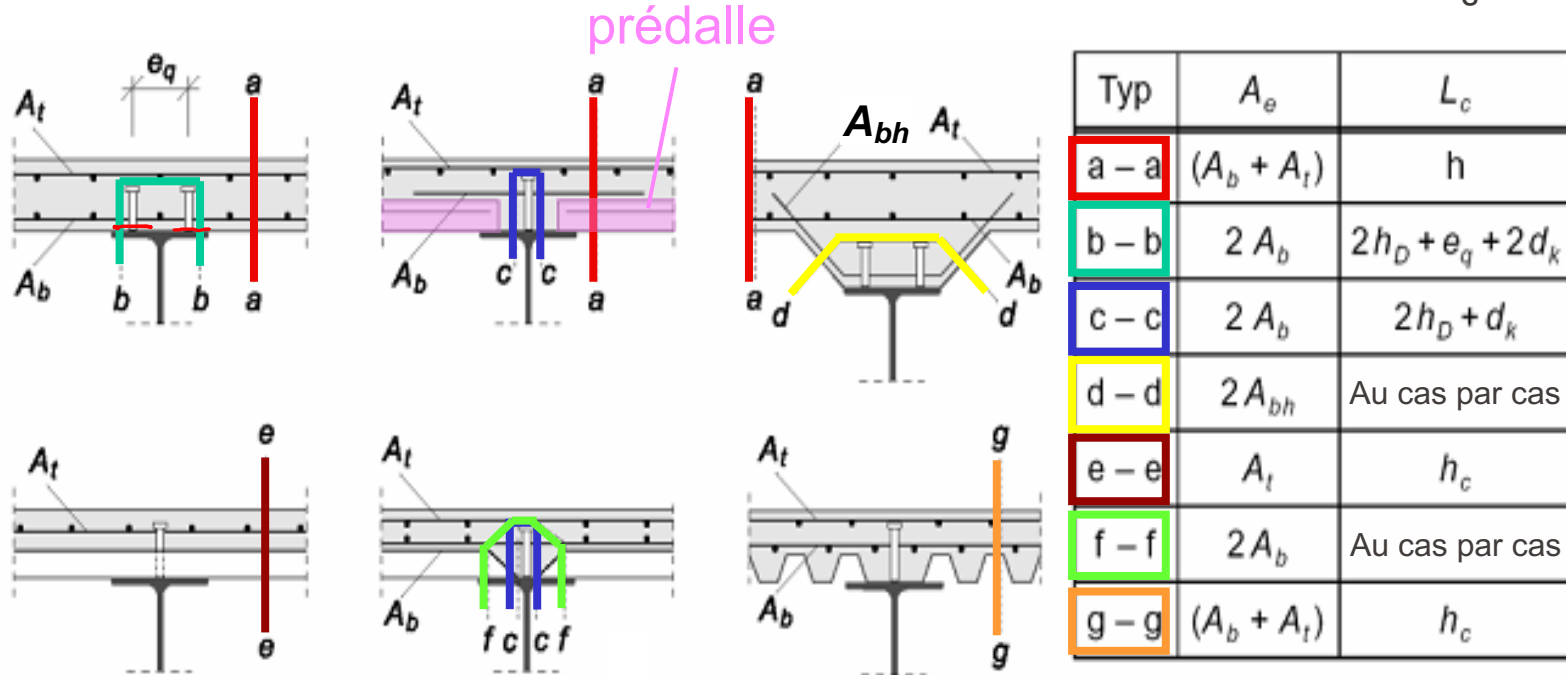
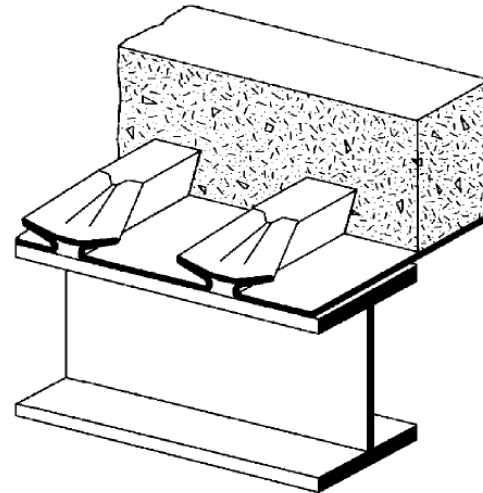
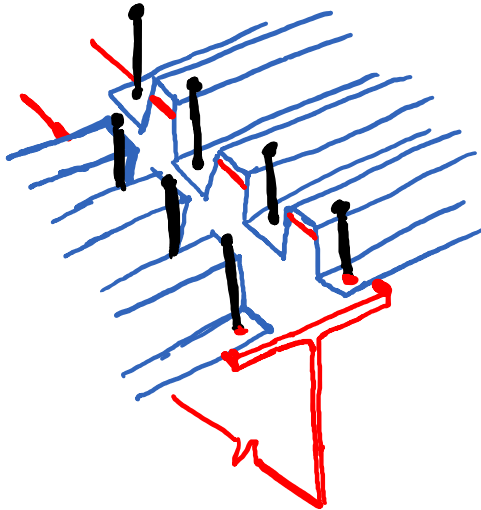


Fig. 10.41 – TGC 11

Cisaillement longitudinal, tôles interrompues sur poutre

- Nervures perpendiculaires interrompues au droit de la semelle supérieure de la poutre, tôles
 - soudées par goujons (à travers tôle profilée)
 - non-liées à la poutre, mais ancrées (anti-gliss.)



Cisaillement longitudinal dans la dalle

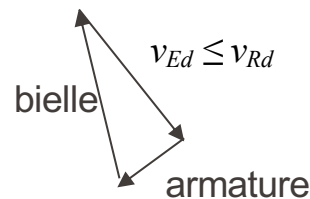
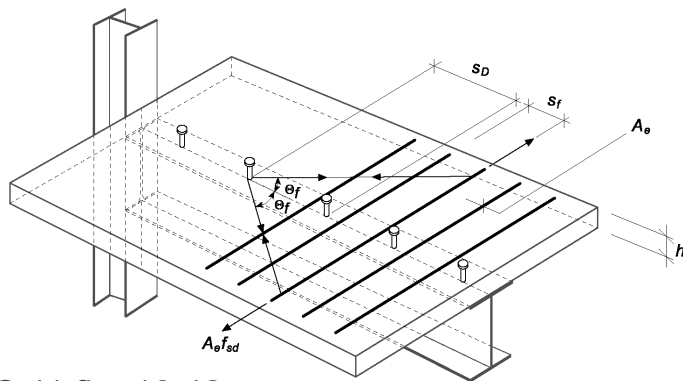
- Analogie du treillis
- Contribution de l'armature transversale de la dalle v_{Rd}

$$V_{Rd} = \frac{A_e}{s_f} f_{sd} \cot(\theta_f)$$

$$V_{Rd} \leq k_c f_{cd} L_c \sin(\theta_f) \cos(\theta_f)$$

Armature transversale tendue

Limitation due à la ruine de la bielle comprimée de béton
($k_c = 0.55$, $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$)



Angle bielles:

- Si béton - : $25^\circ < \theta_f < 45^\circ$
- Si béton + : $35^\circ < \theta_f < 45^\circ$

TGC 11 fig. 10.42
SIA 264 fig. 4

Cisaillement longitudinal dalle avec tôle

- Tôle nervures continues perpendiculaires à la poutre, ajout de la contribution de la tôle

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} + V_{pd}$$

$$V_{pd} = \frac{A_p \cdot f_{yp}}{\gamma_{ap}}$$

V_{Rd} contribution de l'armature

V_{pd} contribution de la tôle profilée

f_{yp} limite d'élasticité de l'acier de la tôle

A_p section transversale de la tôle profilée par unité de largeur

γ_{ap} = 1.05 (tôle)

- Interrompues au droit de la semelle supérieure de la poutre, mais soudée par goujons -> voir annexe

TGC 11 §10.5.7
SIA 264 §5.1.4.8

Connexion partielle

TGC 11 §10.5.5

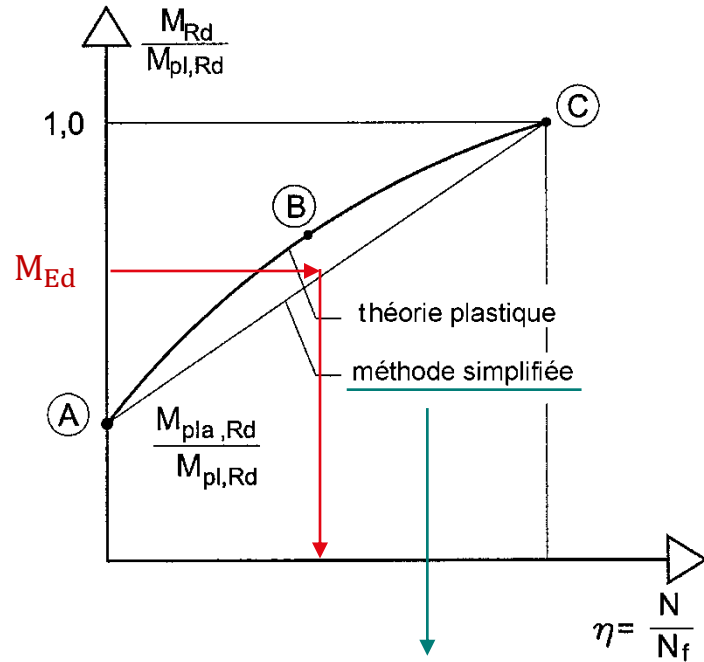
Connexion partielle

Définition:

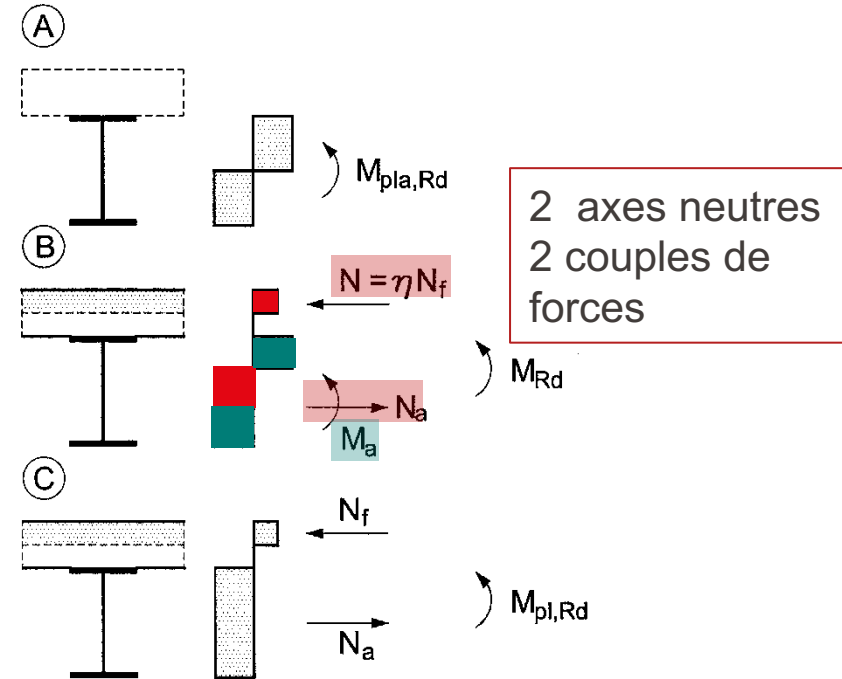
Connexion partielle: Connexion avec un nombre réduit de connecteurs qui ne permet pas d'atteindre la résistance plastique complète de la poutre mixte.

- Calcul plastique, résistance ultime de la poutre mixte limitée par celle de la connexion
- Applicable dans le cas du calcul des poutres mixtes de bâtiment sous M+, avec connecteurs souples
- pour les poutres de 5 à 10 m de portée, le degré de connexion ($N_{\text{partiel}}/N_{\text{total}}$) doit rester supérieur à 40%

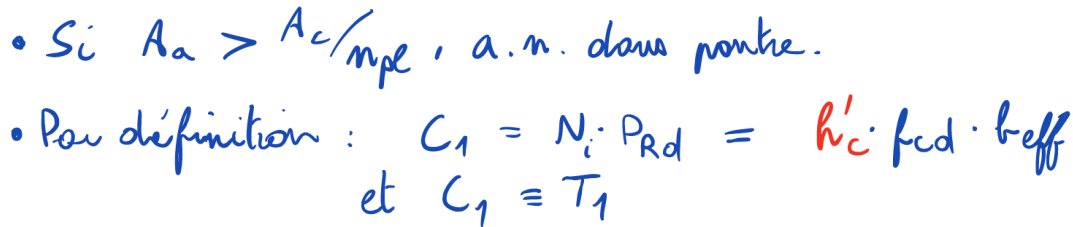
TGC 11, fig. 10.34 Principe de la connexion partielle



$$M_{Ed} = M_{Rd} = M_{pla,Rd} + \frac{(M_{pl,Rd} - M_{pla,Rd})N}{N_f}$$



N : nb de connecteurs
 N_f : nb de connecteurs nécessaires en connexion totale


$$h'_c = \frac{N_i \cdot P_{rd}}{f_{cd} \cdot b_{eff}} = \frac{A_c \cdot f_{cd} \cdot N_i \cdot \cancel{P_{rd}}}{\underbrace{N_f \cdot \cancel{P_{rd}}}_{\text{comm. tot. } A_c \cdot f_{cd} = N_f \cdot P_{rd}} \cdot f_{cd} \cdot b_{eff}} = \frac{A_c \cdot N_i}{b_{eff} \cdot N_f} \quad (10.69)$$

Analyse interaction partielle, courbe A-B-C

- On déduit donc M_{R1} :

$$M_{R1} = C_i (h - z_a - h'_c/2) = N_i \cdot P_{Rd} \cdot (h - z_a - h'_c/2)$$

- Note : pour caractéristiques plastiques en section (Tab. 10.23)
remplacer h_c par h'_c , et A_c par $A'_c = l_{eff} \cdot h'_c$

Formule interaction N+M:
SIA 263, équ. (45)

$$M_{ply,N,Rd} = M_{R2} = M_{ply,Rd} \cdot \xi \cdot (1 - \eta) \leq M_{ply,Rd}$$

Dans notre cas : $N_{Ed} = T_1 / \gamma_a = N_i \cdot P_{Rd} / \gamma_a$

$$N_{ply,Rd} = N_f \cdot P_{Rd} / \gamma_a \text{ cas contr. totale.}$$

$$M_{ply,Rd} = M_{pl,a} / \gamma_a \quad M_{pl} \text{ résistant du profilé}$$

- Finalement on obtient :

$$M_{plb,pent,Rd} = M_{R1} + M_{R2} = N_i \cdot P_{Rd} (h - z_a - \frac{h'_c}{2}) + M_{pl,a} / \gamma_a \cdot \xi \cdot (1 - \frac{N_i}{N_f})$$

comme $h'_c = \frac{A_c}{l_{eff}} \frac{N_i}{N_f}$, il s'agit d'une équ. du 2^{ème} degré.

Méthode de dimens., courbe simplifiée = droite

- Nb de goujons nécessaires:
$$N_{nec} \geq \frac{M_{Ed} - \frac{M_{pl,a}}{\gamma_a}}{\frac{M_{pl,b}}{\gamma_a} - \frac{M_{pl,a}}{\gamma_a}} N_f$$

(pour $M_{Ed} < M_{plb,Rd}$)
- Poutres laminées, limitation degré de connexion:

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

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

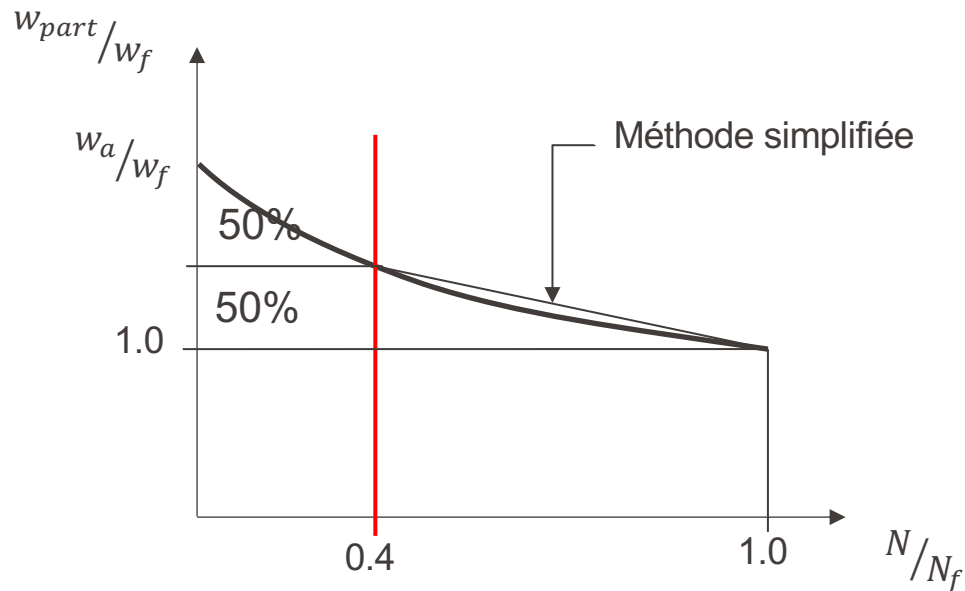
L_e distance entre points de moment nuls [m]

- Et aux ELS, pour le calcul des flèches?

Calcul des flèches

- Augmentation des flèches dues aux glissements à l'interface
- Estimation avec méthode simplifiée similaire à précédente:

$$w_{\text{part}} = w_f + 0.5(w_a - w_f) \left(1 - \frac{N}{N_f}\right) \text{ si } \frac{N}{N_f} \geq 0.4$$



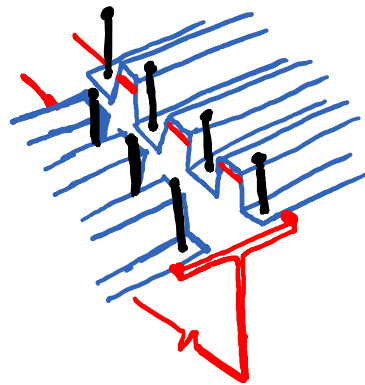
Annexes

Cisaillement longitudinal avec tôles interrompues

- Nervures perpendiculaires interrompues au droit de la semelle supérieure de la poutre, mais soudée par goujons (à travers la tôle profilée)

v_{pd} contribution des goujons soudés/tôle profilée

$P_{pb,Rd}$ résistance à la pression latérale de la tôle



$$v_{pd} = \frac{P_{pb,Rd}}{s_d} \leq \frac{A_p f_{yp}}{\gamma_{ap}}$$

$$P_{pd,Rd} = k_{\phi} d_{d0} t f_{yp} \frac{1}{\gamma_{ap}}$$

$$k_{\phi} = 1 + a/d_{d0} \leq 6.0$$

f_{yp}

limite d'élasticité de l'acier de la tôle

A_p

section transversale de la tôle profilée par mètre de largeur

d_{d0}

diamètre de la soudure du goujon

t

épaisseur de la tôle

a

distance entre le centre du goujon et le bord de la tôle

s_d

espacement longitudinal des goujons