

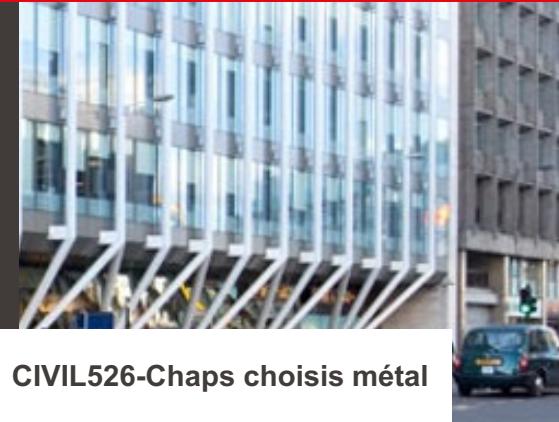


# Poutres mixtes

## Partie c

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

Prof. A. Nussbaumer  
RESSLab

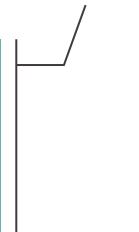


- Connexion
- Cisaillement longitudinal
- Connexion partielle
- Annexes

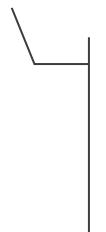
# Types de connexion

- Deux types de connexion:

totale ou partielle



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



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

- obligatoire pour les ponts
- souvent utilisée dans les bâtiments

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

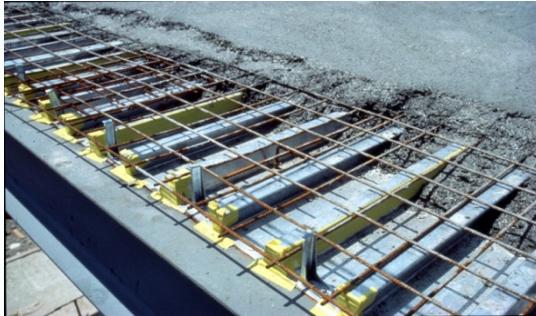
# Principe du dimensionnement de la connexion

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



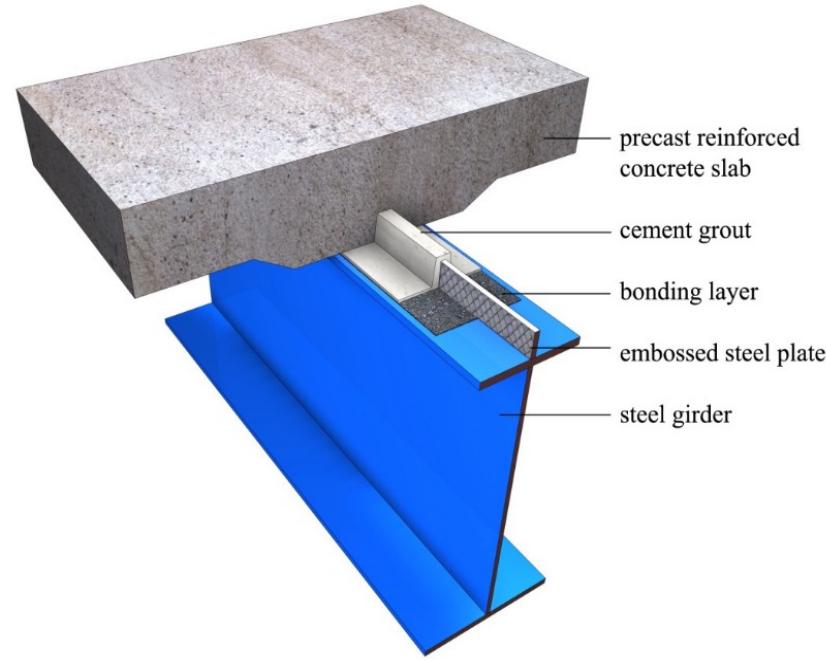
Goujons à tête



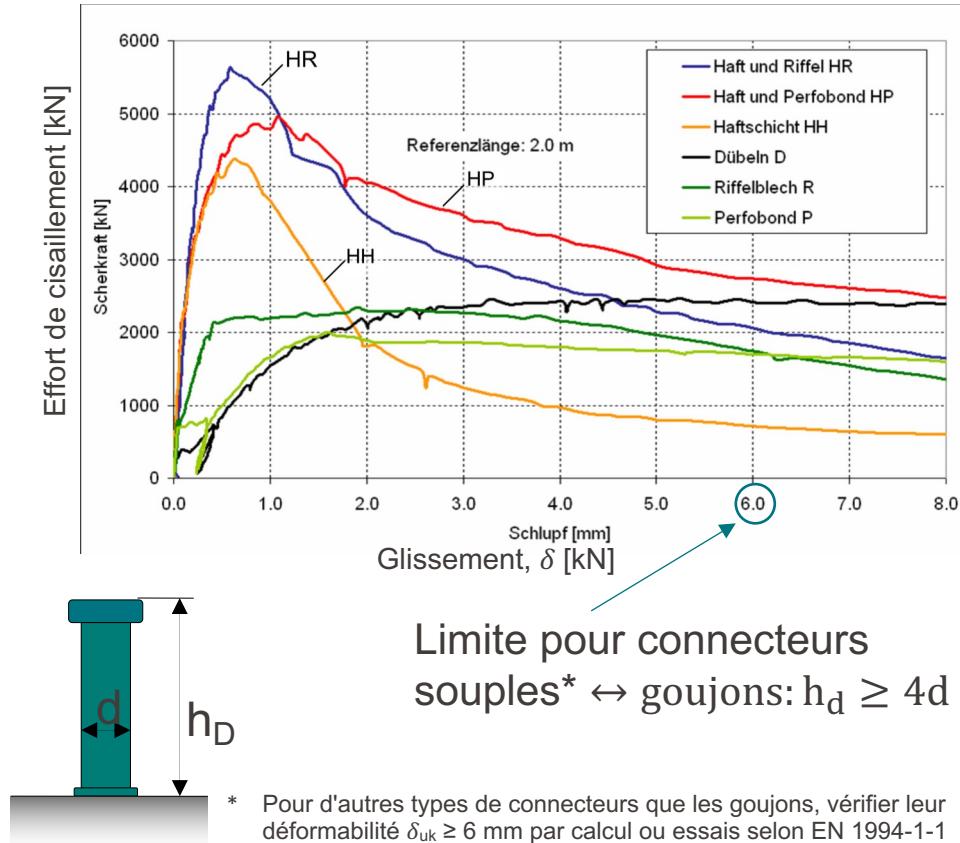
goujons Hilti



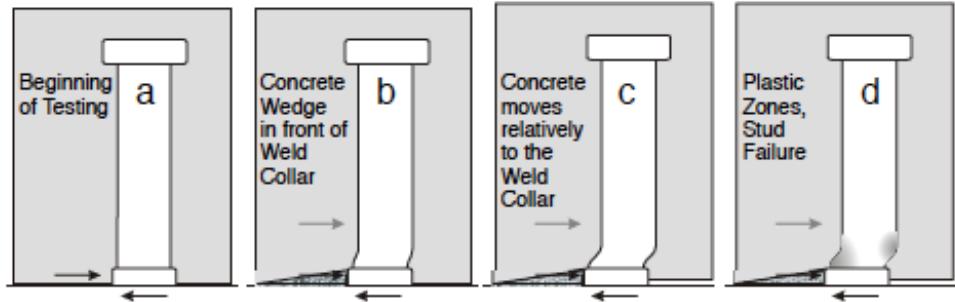
Tôles Perfobond



# Résistance de la connexion, essais push-out

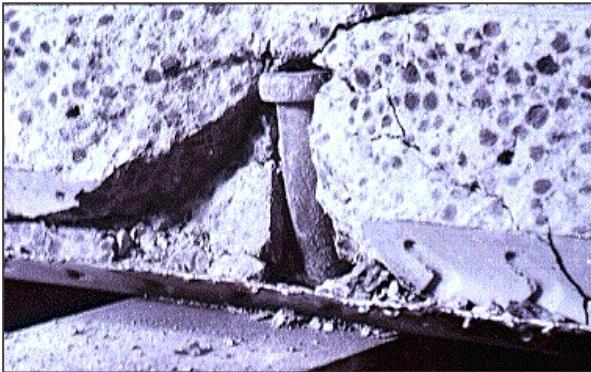


# Connexion par goujon à tête, modes de rupture



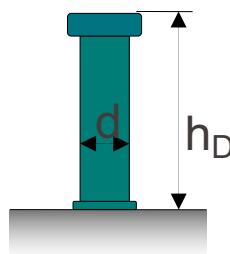
Par plastification en  
cisaillement de la  
tige du goujon

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 :

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

$$P_{Rk}^1 = \frac{0.8 f_{uD} \pi d^2}{4}$$

↑

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/mm<sup>2</sup>)

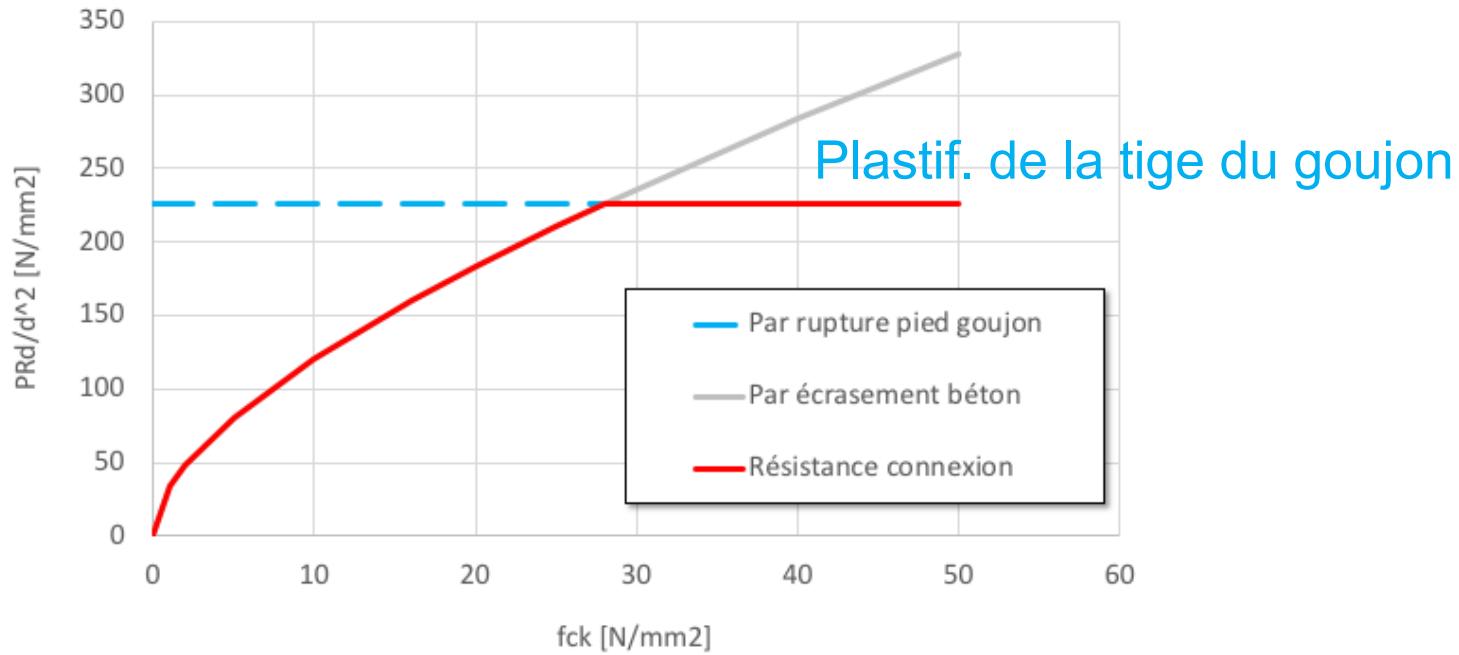
- Résistance ultime de calcul

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 -&gt;

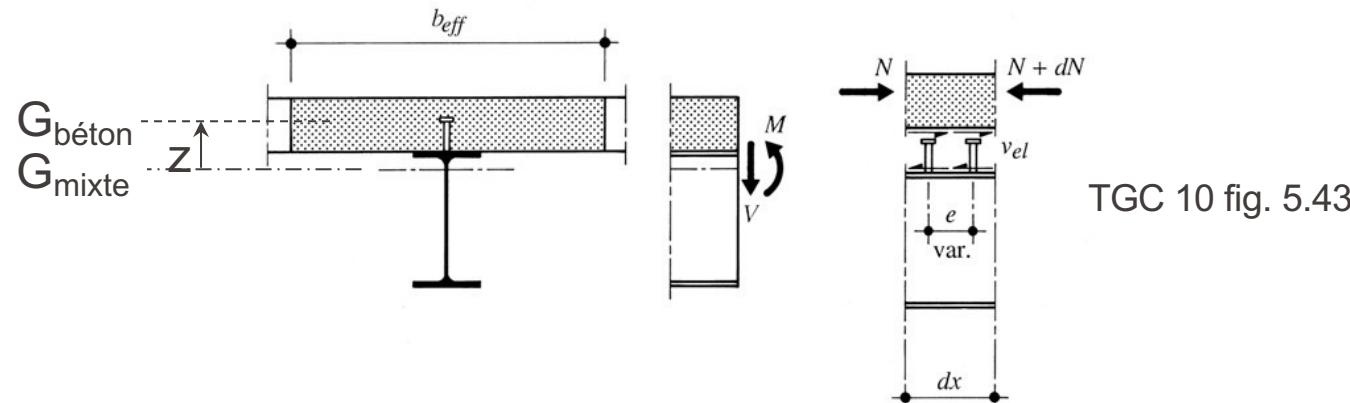
Pont -&gt;

Diamètre du goujon, d	Calcul plastique			Calcul élastique			
	Béton C 20/25	Béton C 25/30	Béton C 30/37	Béton C 16/20	Béton C 20/25	Béton C 25/30	Béton 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 :

$$\nu_{el,Ed}(x) = \frac{S_{b\text{éton}}}{n_{el} I_{mixte}} V_{Ed}(x) \quad \nu_{el,Ed}(x) = \sum \frac{S_{c,i}}{n_{el,i} I_{b,i}} V_{Ed,i}(x)$$

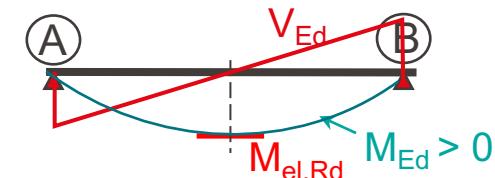
$\nu_{Ed,i}(x)$  provenant des actions agissant sur le mixte !! (après réalisation de la connexion)

# Calcul élastique de la connexion

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

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

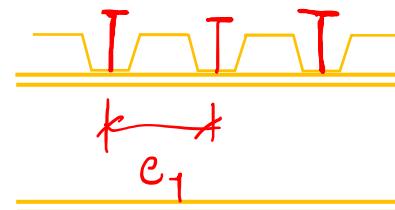
Résistance d'un connecteur



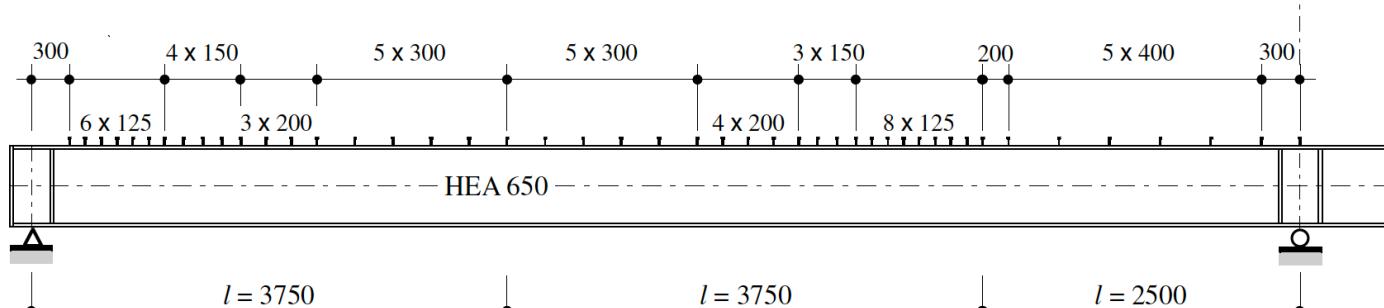
- Le nombre de connecteurs se traduit par un espacement longitudinal entre les rangées transversales.
- $v_{el,Ed}(x)$  varie le long de la poutre (avec l'effort tranchant) donc le nombre/m, ou l'espacement longitudinal entre connecteurs,  $e_1$ , aussi.
- Nombre de connecteurs par rangée:

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

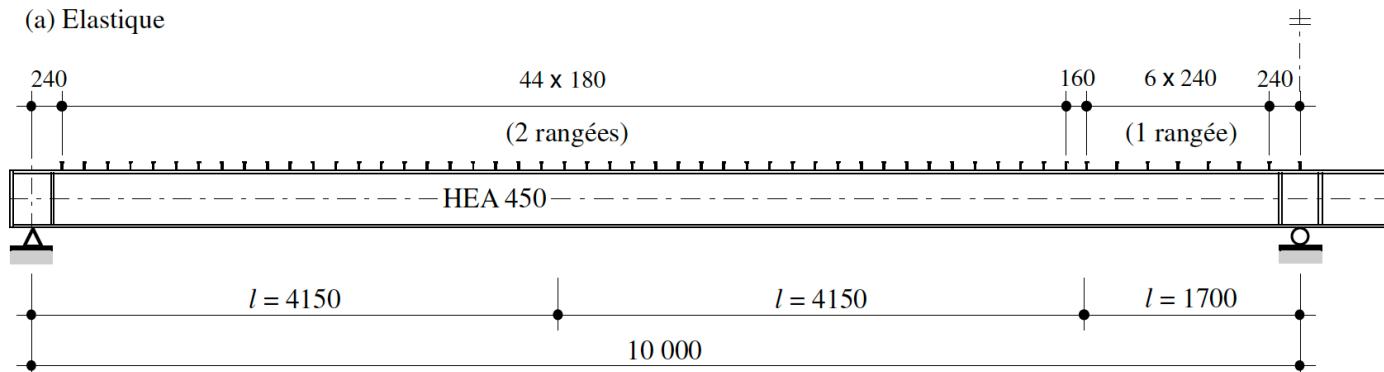
Typiquement:  $150 < e_1 < 400$  mm



# Fig. 10.45 exemple répartition connecteurs



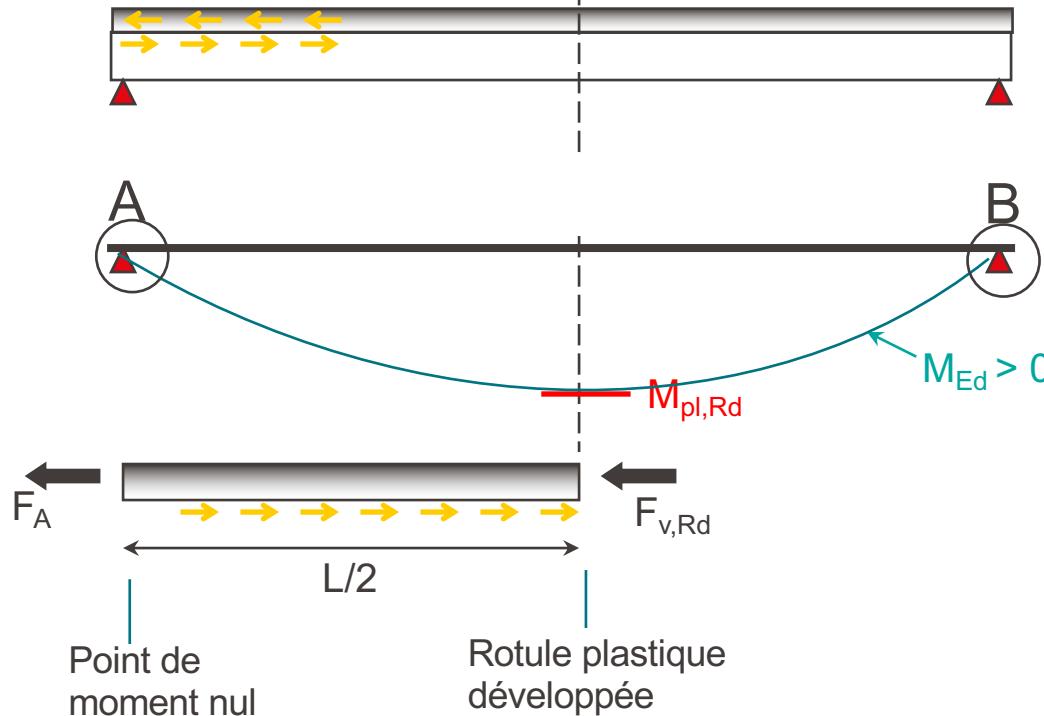
(a) Elastique



(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)

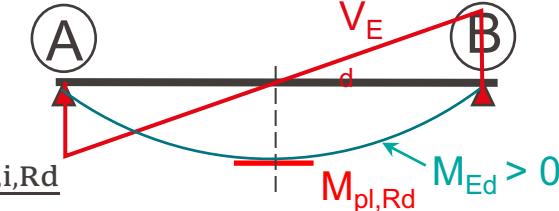
$$F_A = 0 \text{ (ou } F_B = 0\text{)}$$

- Equilibre du bloc béton

$$F_{V,Rd} - F_A = F_{V,Rd} \leq v_{pl,Rd} \cdot \frac{L}{2}$$

d'où  $N_{connect} \geq \frac{F_{V,i,Rd}}{P_{pl,Rd}}$

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



- Résistance en travée

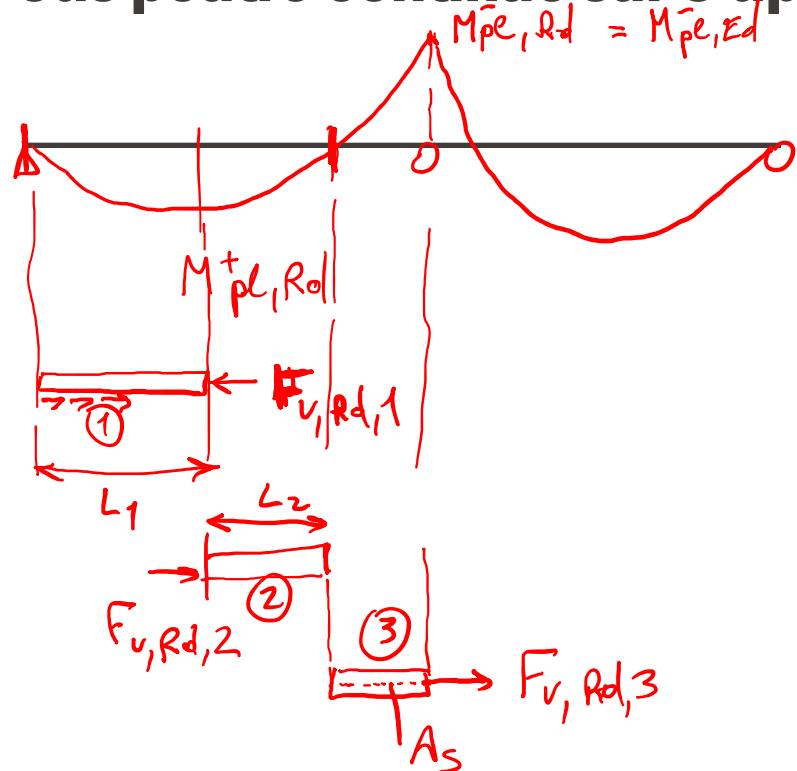
$$F_{V,i,Rd} = \frac{0.85 f_{ck}}{\gamma_c} b_{eff} h_c$$

si l'ANP est dans le profilé

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

si l'ANP est dans la dalle

# Cas poutre continue sur 3 appuis, plusieurs tronçons



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

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

$$\textcircled{2} \quad :$$

$$\textcircled{3} \quad :$$

Calcul Plastique : connecteurs  
simples ! Goujons :

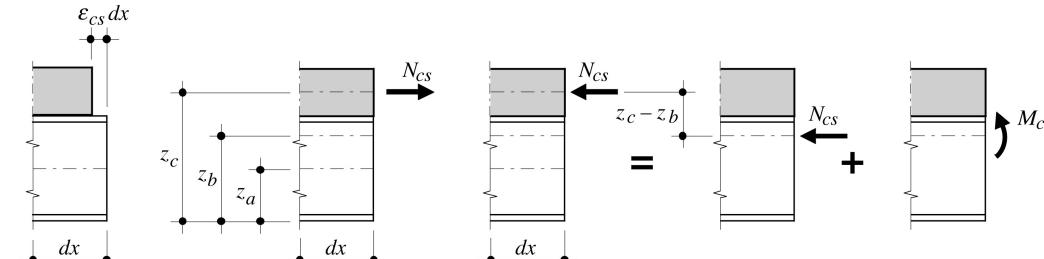
$$\frac{h_d}{\phi} > 4$$

# Zones d'extrémités: ancrage pour efforts dus au retrait

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

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

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

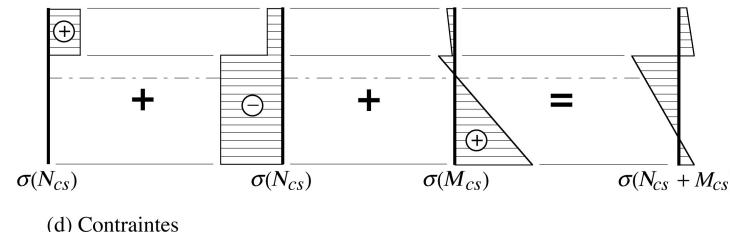


(a) Retrait libre

(b) Compatibilité des déformations

(c) Equilibre des forces

TGC 10 fig.  
5.39



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

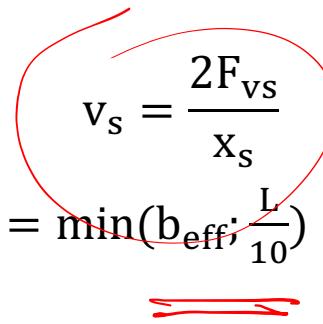
$$F_{vs} = \sigma_{ag,s} \cdot A_a \text{ ou } \sigma_{cs} \cdot A_c$$

# Zones d'extrémités: ancrage pour efforts dus au retrait

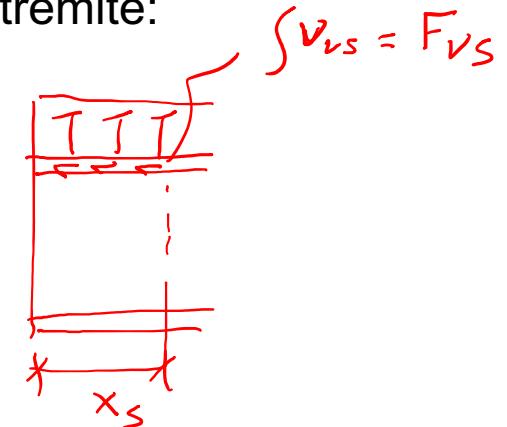
- Voir TGC 11 fig. 10.32, surtout pour ponts
- Effort axial d'extrémité à ancrer  $F_{vs}$

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

- 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

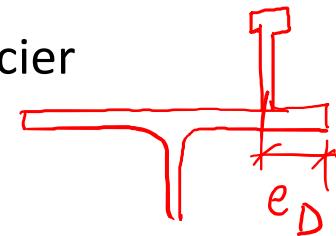
## ▪ Espacement longitudinal des connecteurs

- 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 : $e_D = 9t_f\sqrt{235/f_y}$



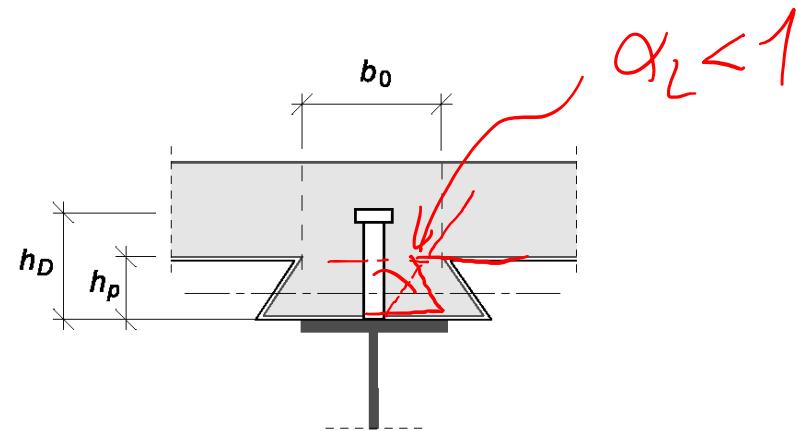
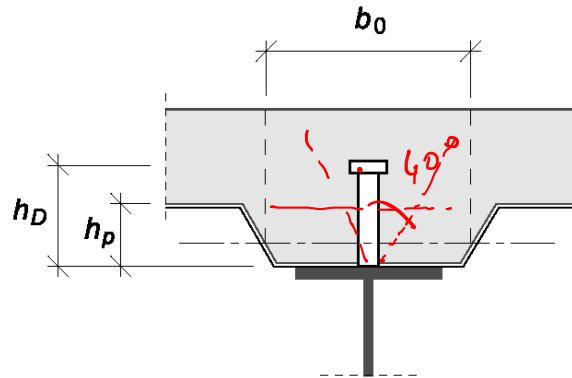
# Résistance connexion, particularités (TGC11 §10.5.6)

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

$P_{Rd}$  doit être multipliée par  $\alpha_L$ :

$$\alpha_L = \frac{0.6b_0}{h_p} \left( \frac{h_D}{h_p} - 1 \right) \leq 1.0$$

- Coupes transversales : (TGC 11 fig. 10.39)



# Résistance connexion, particularités

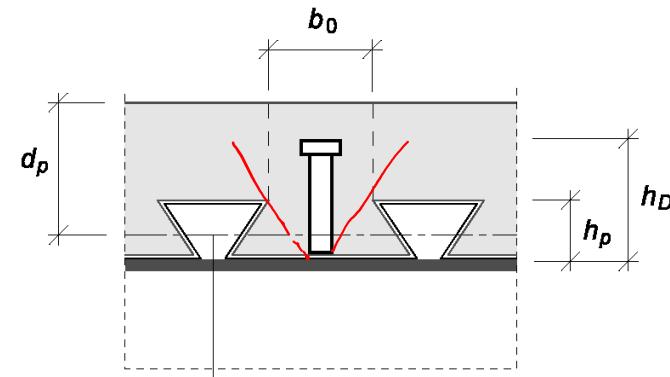
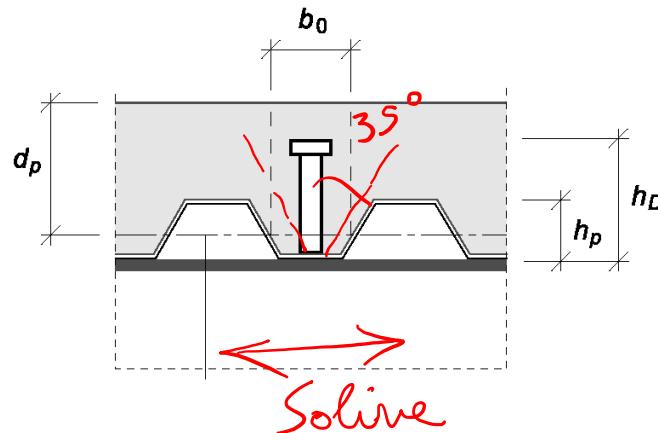
- Influence de la présence d'une tôle profilée perpendiculaire à la poutre:

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

Avec  $N_r$  = nombre de goujons par nervure



- Coupes longitudinales : (TGC 11 fig. 10.39)



# Cisaillement longitudinal

# Cisaillage longitudinal dans la dalle (TGC11 §10.5.7)

- Vérification de l'armature transversale traversant les plans cisaillés de la dalle :

SIA 264 §5.1.4.8

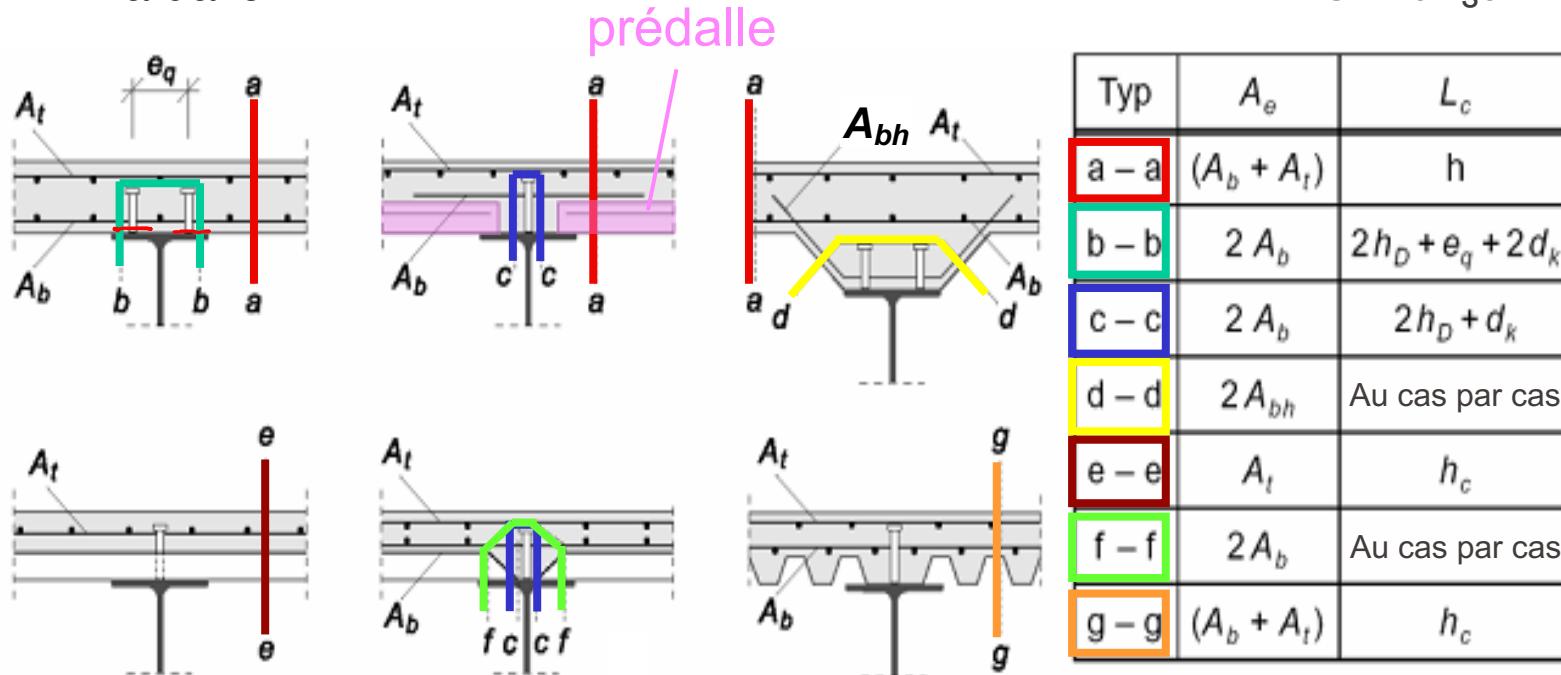
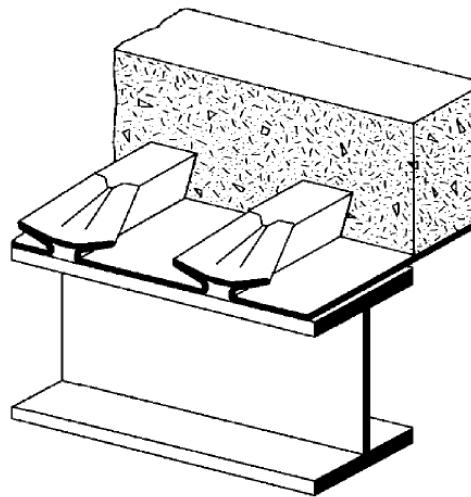
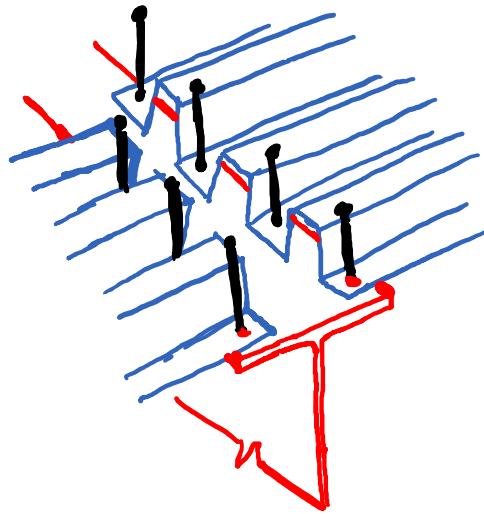


Fig. 10.41 – TGC 11

# 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.)

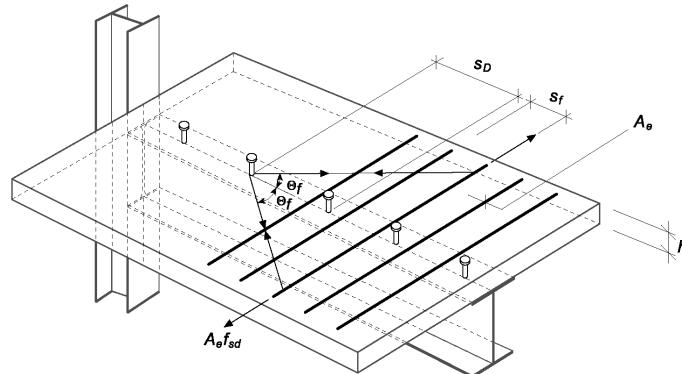


# Cisaillement longitudinal dans la dalle

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

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

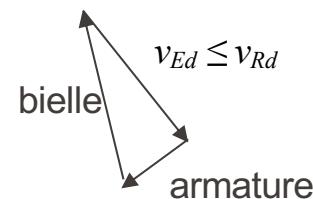
$$V_{Rd} \leq k_c f_{cd} L_c \sin(\theta_f) \cos(\theta_f)$$



TGC 11 fig. 10.42  
SIA 264 fig. 4

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 + :  $35^\circ < \theta_f < 45^\circ$

# Cisaillement longitudinal dalle avec tôle

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

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

$v_{Rd}$  contribution de l'armature

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

$v_{pd}$  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

$\gamma_{ap}$  = 1.05 (tôle)

- Interrrompues 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

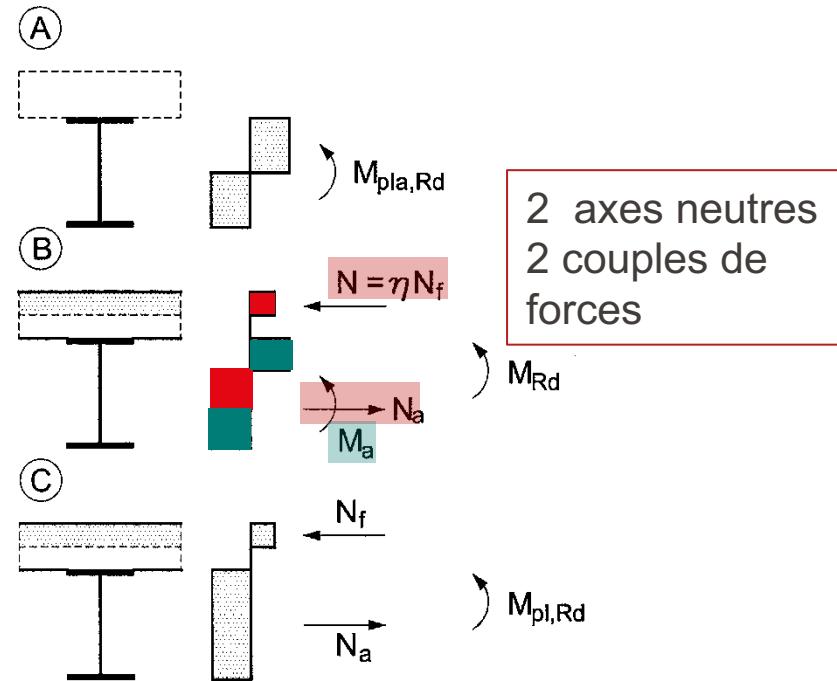
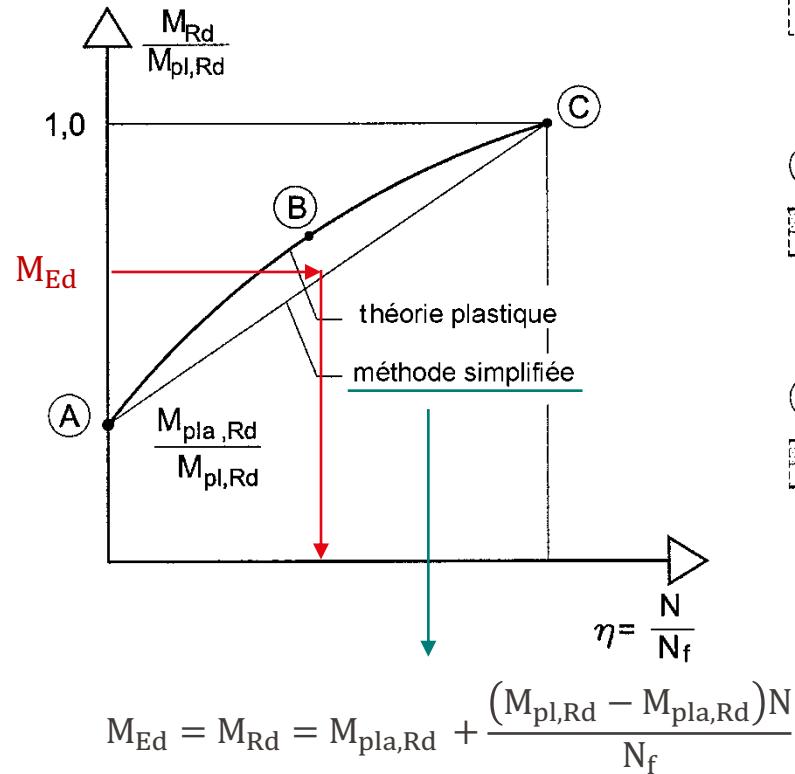
Définition:

**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 ( $N_{partiel}/N_{total}$ ) doit rester supérieur à 40%

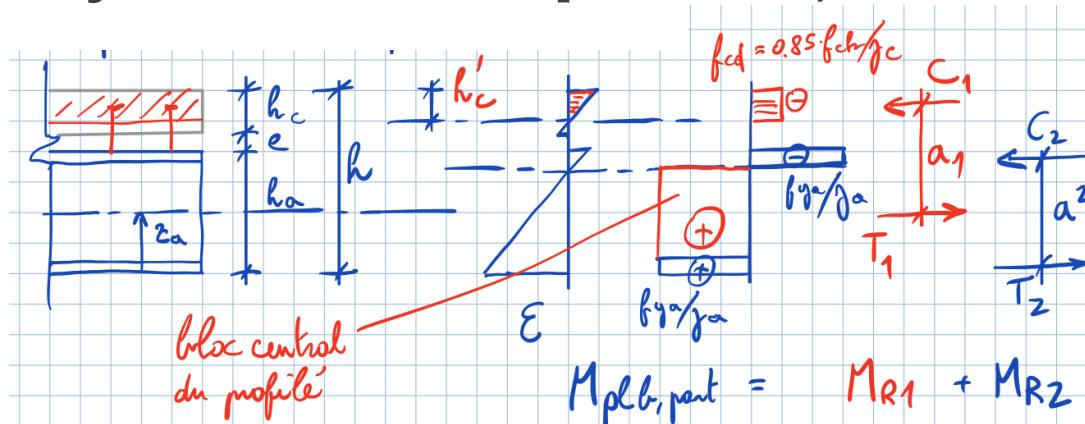
# EPFL TGC 11, fig. 10.34 Principe de la connexion partielle

29



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

# Analyse interaction partielle, courbe A-B-C



- Si  $A_a > A_c/m_p$ , a.n. dans pointe.
  - Par définition :  $C_1 = N_i \cdot P_{Rd} = h'_c \cdot f_{cd} \cdot b_{eff}$   
et  $C_1 = T_1$

$N_i$  = nb. de gongions de l'appui à  $M_{max}$

$$h_c' = \frac{N_i \cdot P_{rd}}{f_{cd} \cdot b_{eff}} = \frac{A_c \cdot f_{cd} \cdot N_i \cdot P_{rd}}{N_f \cdot P_{rd} \cdot f_{cd} \cdot b_{eff}} = \frac{A_c \cdot N_i}{b_{eff} \cdot N_f}$$

comm. Edt.  $A_c \cdot f_{cd} = N_f \cdot P_{rd}$

**(10.69)**

# Analyse interaction partielle, courbe A-B-C

- On déduit donc  $M_{R1}$ :

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

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

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

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

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

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

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

- Finalement on obtient :

$$M_{plb,part,Rd} = M_{R1} + M_{R2} = N_i \cdot P_{Rd} \left( h - z_a - \frac{h'_c}{2} \right) + M_{ply}/z_a \cdot \xi \cdot \left( 1 - \frac{N_i}{N_f} \right)$$

comme  $h'_c = \frac{A_c}{b_{eff}} \frac{N_i}{N_f}$ , il s'agit d'une équ. du 2<sup>ème</sup> degré.

# Méthode de dimens., courbe simplifiée = droite

- Nb de goujons nécessaires:  $N_{\text{nec}} \geq \frac{M_{\text{Ed}} - \frac{M_{\text{pl,a}}}{\gamma_a}}{\frac{M_{\text{pl,b}}}{\gamma_a} - \frac{M_{\text{pl,a}}}{\gamma_a}} N_f$   
(pour  $M_{\text{Ed}} < M_{\text{plb,Rd}}$ )
- Poutres laminées, limitation degré de connexion:

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

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

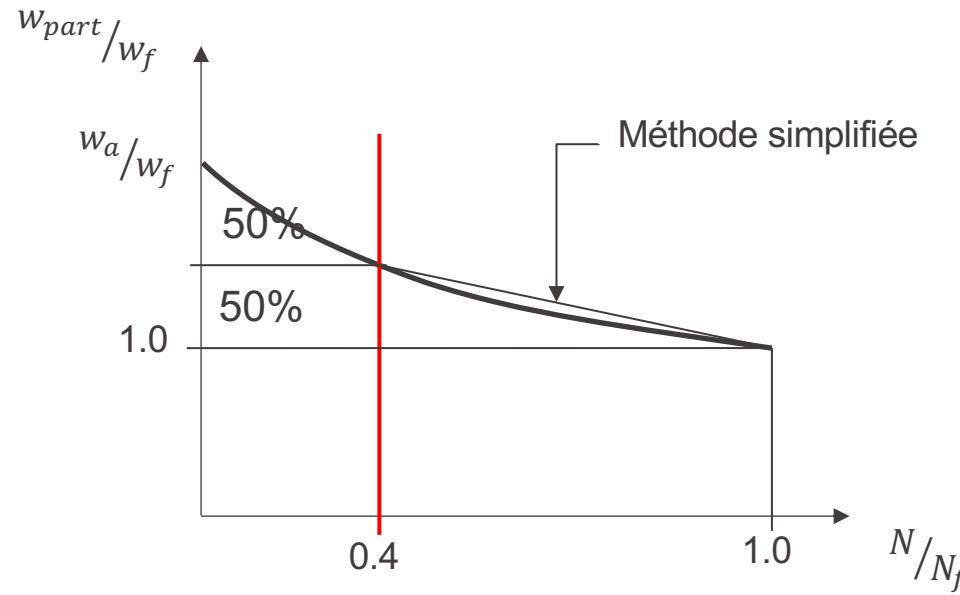
$L_e$  distance entre points de moment nuls [m]

- 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:

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



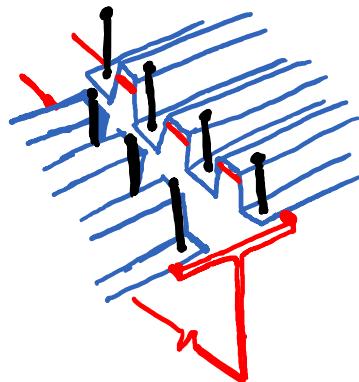
# Annexes

# 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



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

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

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

$f_{yp}$	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