



Poutres mixtes

Part b

**(réfs. TGC 10 chap.4 -5
et TGC 11 § 10.5)**

Prof. A. Nussbaumer
RESSLab

Contenu global

- Introduction (rappels)
- Résistance des sections
- Analyse structurale
- Vérification structurale, ELU
- Vérification aptitude au service, ELS
- Connexion

Contenu partie b

- Analyse structurale
- Vérification structurale, ELU
 - Stade de construction et chargements
- Vérification aptitude au service, ELS
- Chargements particuliers à considérer
- Annexes

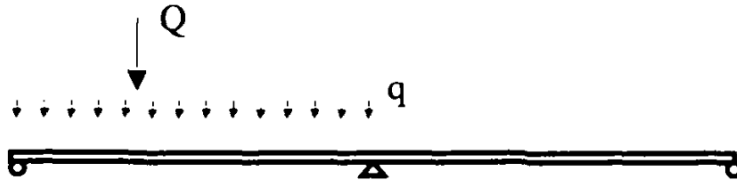
Analyse structurale

TGC 10 § 4.7.4

TGC 11 §10.5.3

Principe détermination efforts intérieurs, M_{Ed} et méthode de calcul

Position 1, moment max en travée



Position 2, moment max sur appui

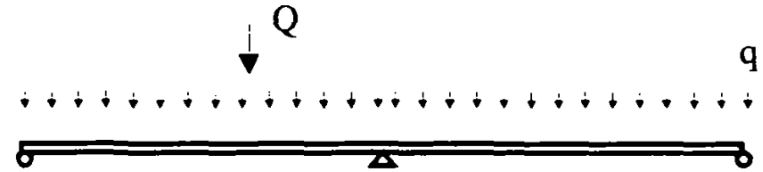
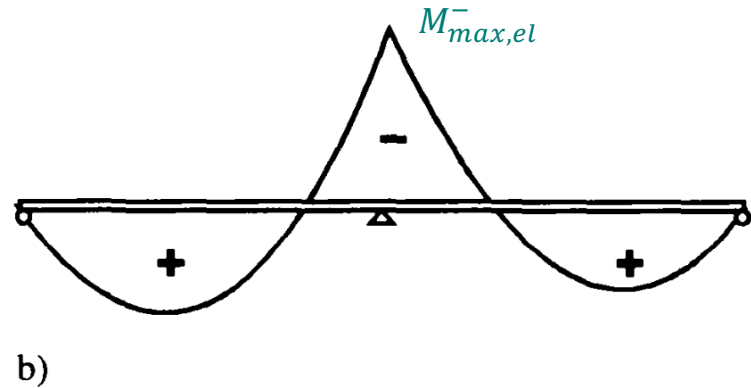
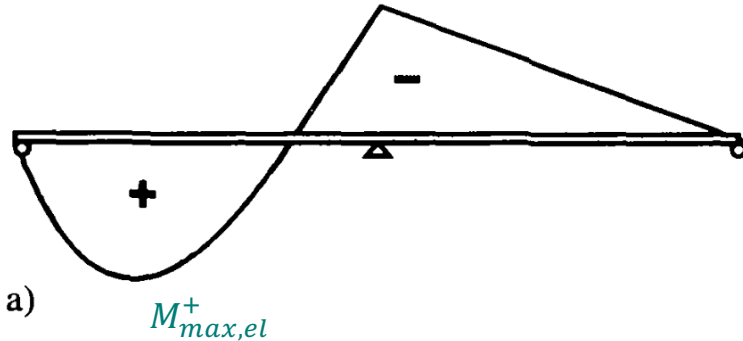
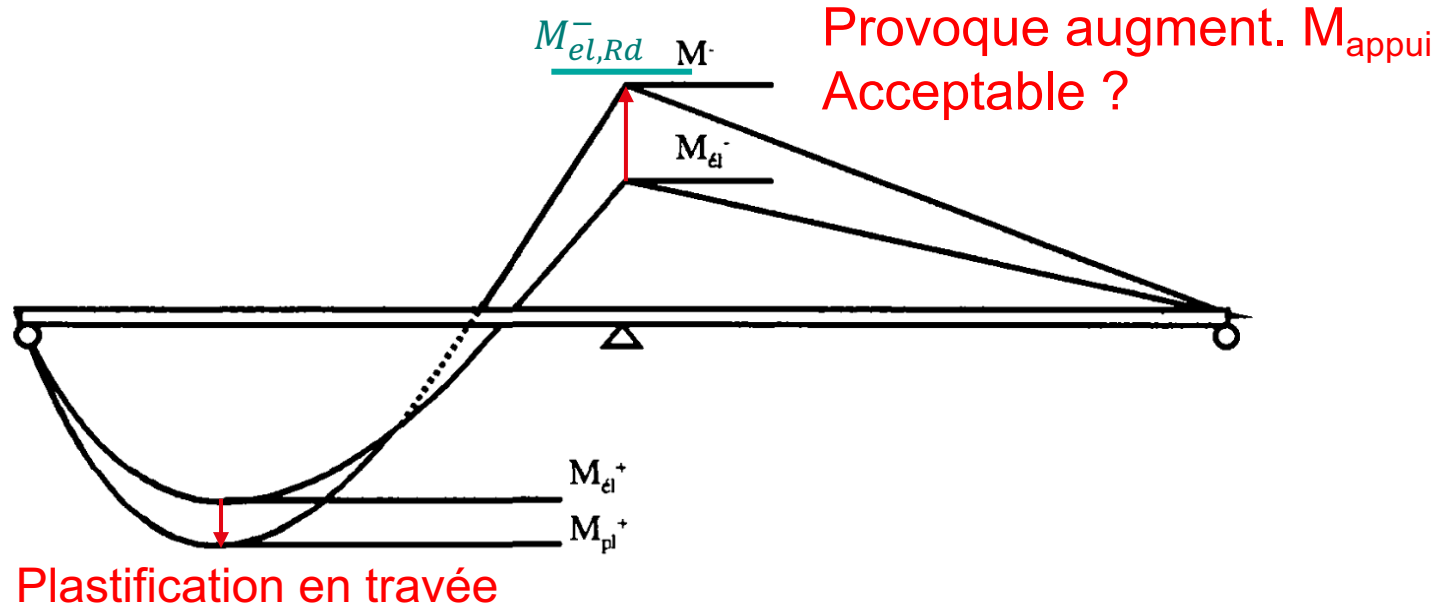


Diagramme des moments

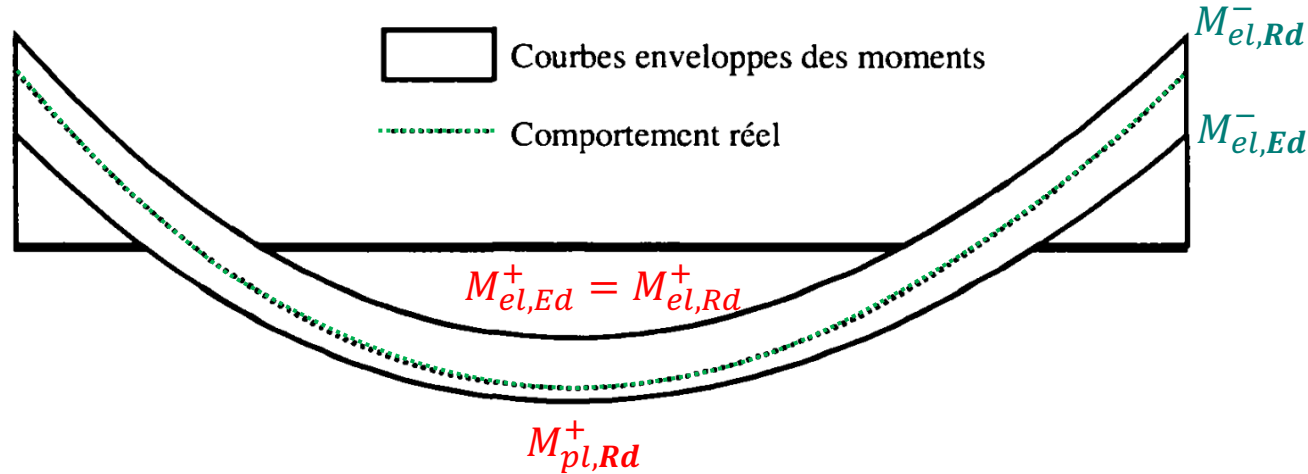


Principe détermination efforts intérieurs, M_{Ed} et méthode de calcul



Principe détermination efforts intérieurs, M_{Ed} et méthode de calcul

Position 1, max en travée

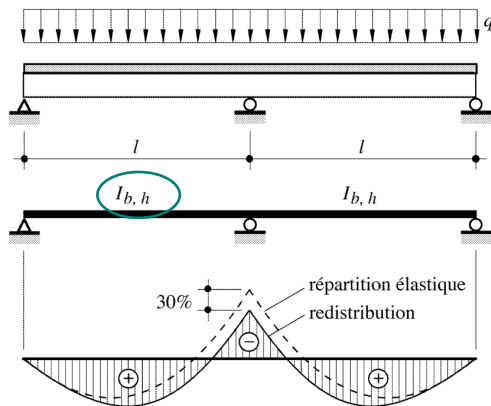


Détermination des efforts intérieurs, M_{Ed} : Calcul élastique, quelle(s) inertie(s) ?

1^{ère} approximation prendre $I_{b,h} = \text{cste}$ (travée, $b_{\text{eff}} = \text{cste}$) et $L_{\text{travée}} = \text{cste}$

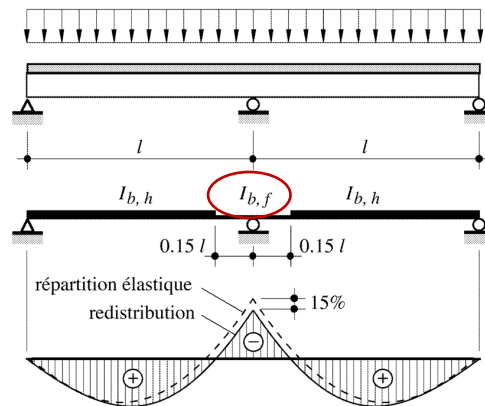
Influence rigidité variable, méthode simplifiée (TGC 11, fig.10.25, Tab. 10.26)

Inertie section homogène en travée



$M_{tr,final} \cong M_{tr} + 30\% M_{ap}$

a) Inertie constante



b) Inertie variable

Inertie section fissurée sur appui

Dans zones M-

	Calcul élastique des efforts intérieurs avec :	Section de classe 1	Section de classe 2
a)	• inertie constante (section non fissurée), fig. 10.25(a)	40%	30%
b)	• inertie variable (section fissurée sur appui), fig. 10.25(b)	25%	15%

% de redistribution max
SIA 264 § 4.2.3.4

SIA 264, redistribution des moments obtenus par calcul élastique

4.2.3.4 La redistribution des moments fléchissants obtenus par une analyse élastique peut être modifiée, tout en respectant l'équilibre, pour tenir compte des effets de la fissuration du béton, du comportement non élastique des matériaux et du voilement local des éléments structuraux en acier.

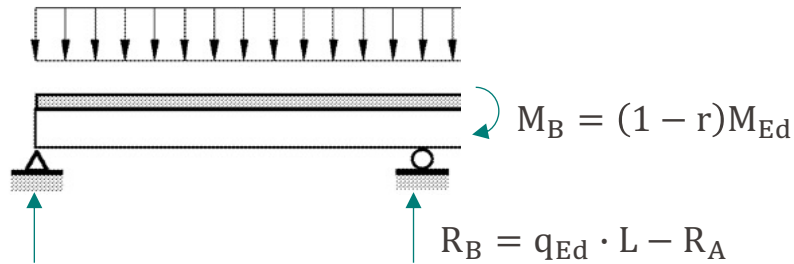
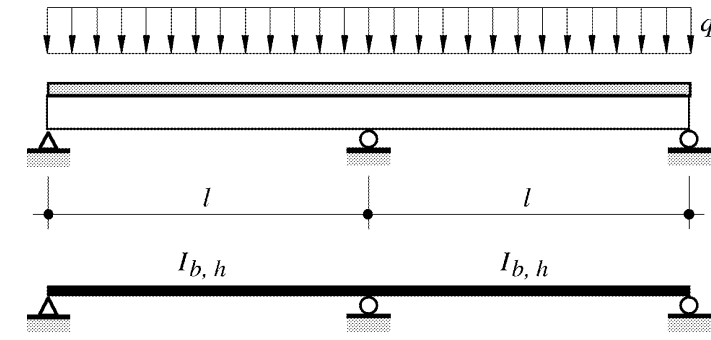
Pour des poutres mixtes continues, de hauteur constante, il est possible de modifier les moments fléchissants résultant d'une analyse élastique en réduisant les moments fléchissants maximaux sur appuis selon les pourcentages indiqués dans le tableau 4 et en augmentant en conséquence les moments en travée correspondants.

Tableau 4: Réduction maximale des moments fléchissants résultant d'une analyse élastique

Classe de section dans les zones de moments fléchissants négatifs	1	2	3	4
Calcul élastique sans prise en compte de la fissuration	40%	30%	20%	10%
Calcul élastique avec prise en compte de la fissuration	25%	15%	10%	0%

4.2.3.5 La résistance ultime plastique des sections en travée des poutres continues et des traverses de cadres tenus latéralement qui remplissent les conditions de la classe de section 2 peut être utilisée lors de la vérification, même si les sections ne remplissent pas ces mêmes conditions dans la zone des appuis et pour autant que la résistance élastique de la section dans la zone des appuis ne soit utilisée qu'à 90% au plus, pour le cas de charge considéré. La vérification au déversement dans la zone des appuis doit alors être effectuée selon la norme SIA 263.

Détermination des efforts intérieurs, M_{Ed} : Calcul élastique, redistribution



$$R_A = q_{Ed} \cdot L/2 - (1 - r)M_{Ed}/L$$

Valeur M_{max}^+ pour, par ex., classe 2:

$r = 30\%$

$$M(x) = -\frac{q_{Ed}(L-x)^2}{2} - \frac{0.7q_{Ed}L^2}{8} + R_B(L-x)$$

$$x_{max} = \frac{3.3L}{8} = 0.4125L$$

$$M_{max}^+ = 0.122 q_{Ed}L^2$$

Par rapport à:

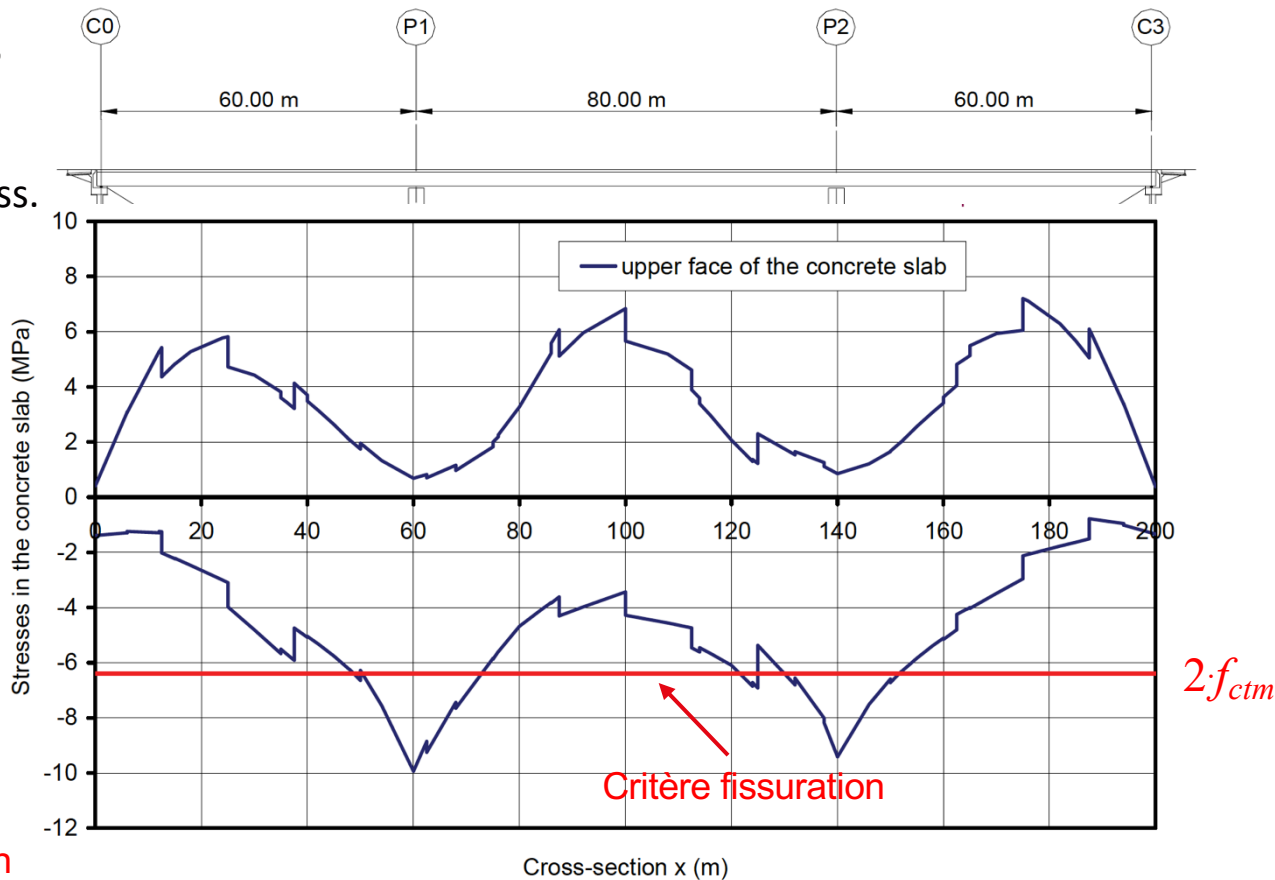
Sans redistrib., $M_{max}^+(0.37L) = 0.0703 q_{Ed}L^2$

Redistribution, sans chercher x_{max}

$$M_{max}^+ = (0.0703 + 0.3/8)q_{Ed}L^2 = 0.108 q_{Ed}L^2$$

Exemple (ponts) pour détermination par calcul zones fissurées

1^{ère} itération,
analyse non-fiss.



Détermination des efforts intérieurs, M_{Ed} , calcul plastique (PP)

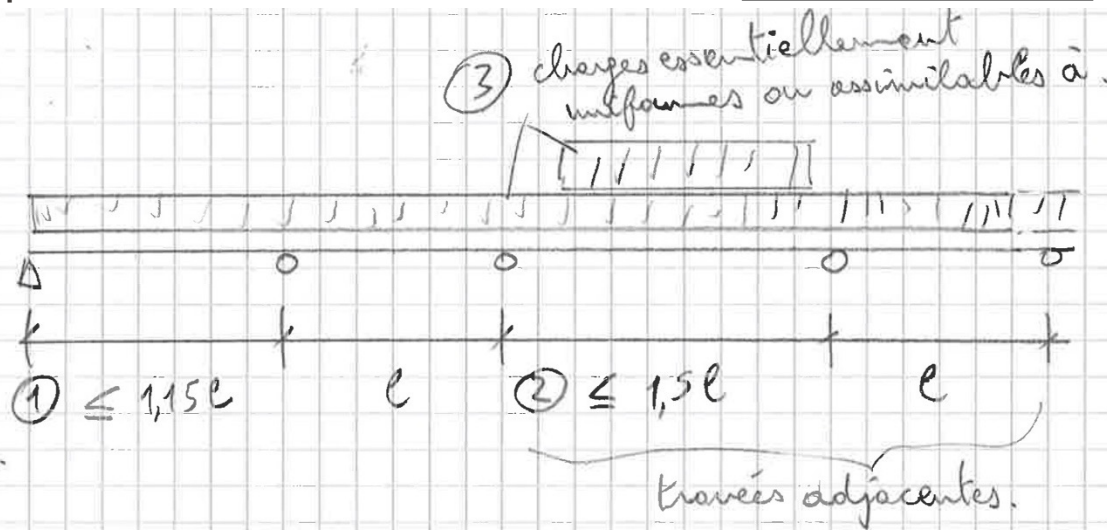
Pour un calcul plastique-plastique (uniqu. bâtiment):

- Classe de section 1, section acier bisymétrique
- Plus proche du comportement réel ultime
- 3 conditions supplémentaires :

SIA 264 § 4.2.3.1

Note:

③ sinon
risque de
mécanisme
partiel pas
pris en compte.



Sécurité structurale

TGC 10 § 4.7.4

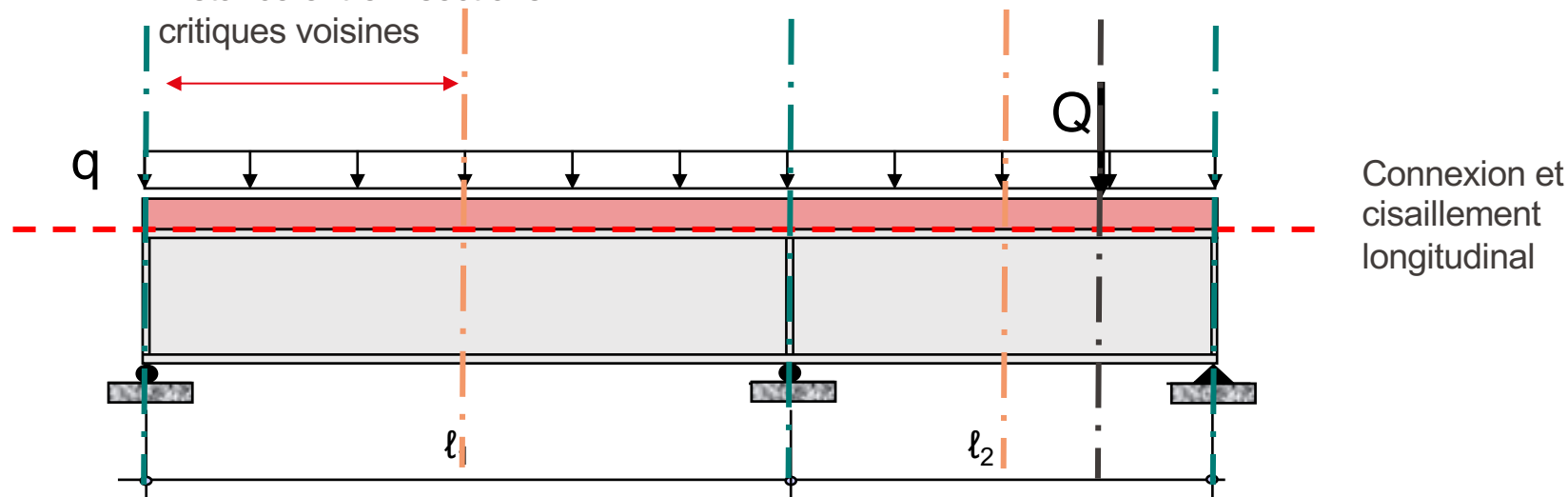
TGC 11 §10.5.3

Sections critiques

- Sur appuis (V, ou M^-+V), y.c. déversement
- En travée, M_{max}^+
- Au droit des charges Q
- Au droit de changements de section importants

Longueur «de cisaillement»:

Distance entre 2 sections critiques voisines



TGC 11, Vérification au déversement «automatique»

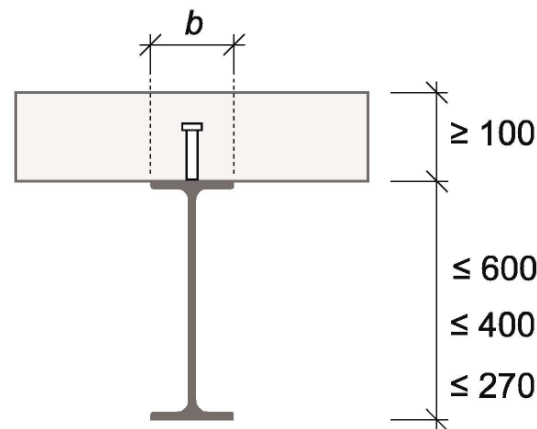
La vérification au déversement aux appuis des poutres continues n'est pas nécessaire si l'on respecte les hauteurs max. suivantes pour les profilés:

SIA 264 §5.1.2.6

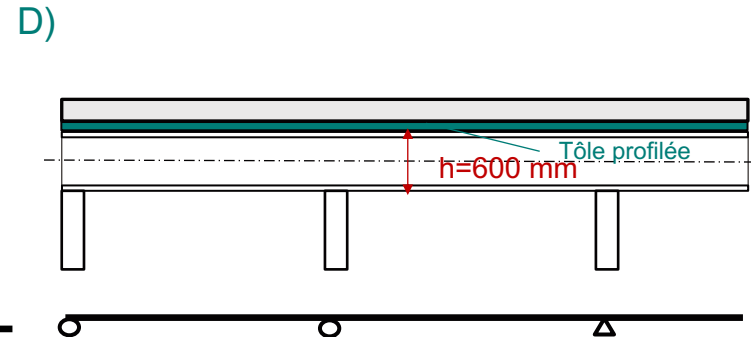
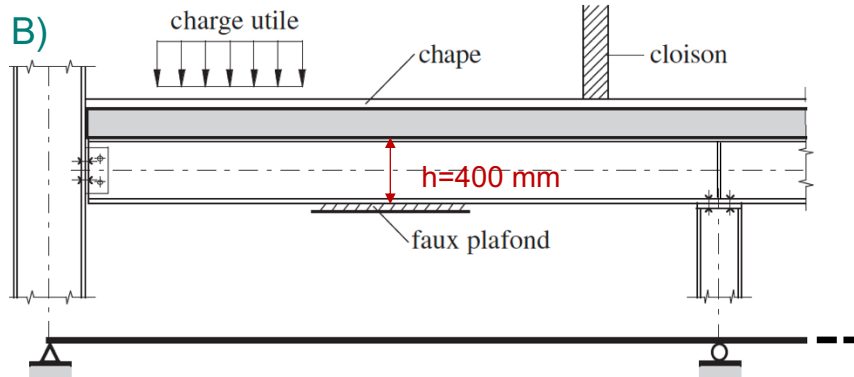
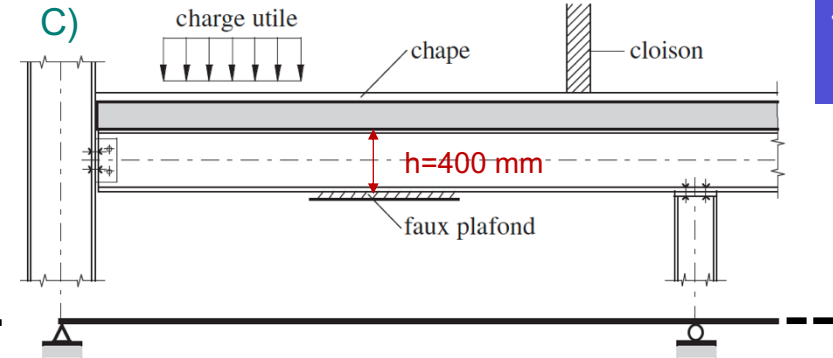
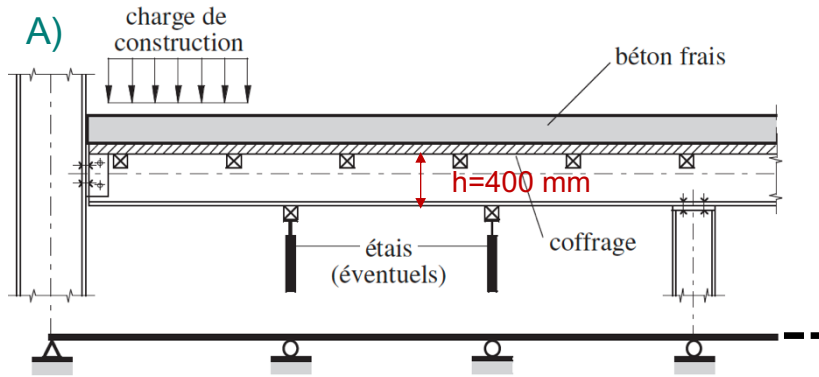
- | | | | |
|----------------|---------------|---------------|--------------------|
| ■ Profilés IPE | 600 mm (S235) | 400 mm (S355) | 270 mm (S420,S460) |
| ■ Profilés HE | 800 mm (S235) | 650 mm (S355) | 500 mm (S420,S460) |

Prérequis:

- Raidisseurs sur appuis
- Connexion par goujons à tête
- Epaisseur de la dalle min. 100 mm (empêche rotation section)



7) Dans quelles situations faut-il vérifier le déversement des poutres IPE (plusieurs possibles) ?



Méthode de dimensionnement, vérification

- Quelque soit la classe, **vérification élastique** sous M^+ (dalle béton comprimée) ou sous M^- (dalle béton tendue et fissurée) :
 - pour toutes les fibres de la section (acier de charpente, béton, armatures passives)

$$\sigma_{Ed,a} = \frac{M_{el}}{I_b} z_b \qquad \sigma_{Ed,c} = \frac{1}{n_{el}} \frac{M_{el}}{I_b} (z_b - h)$$

On additionne les cas de charge

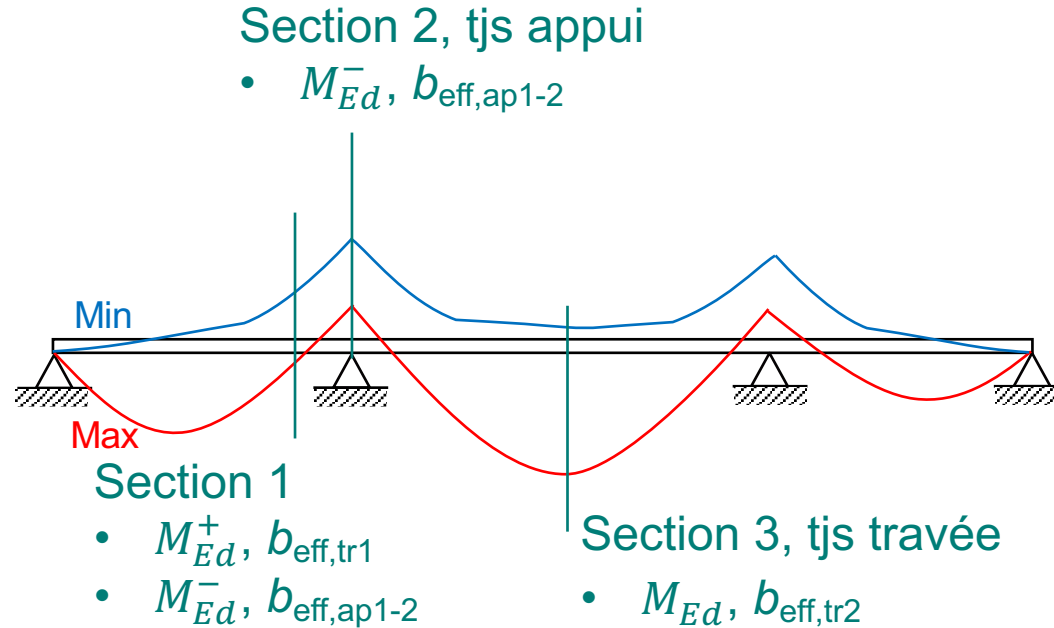
$$\sum_i \sigma_{Ed,i} \leq \frac{f_k}{\gamma_M}$$

- Pour les sections de classe 1 ou 2, **vérification plastique** :

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} = M_{pl,Rd}$$

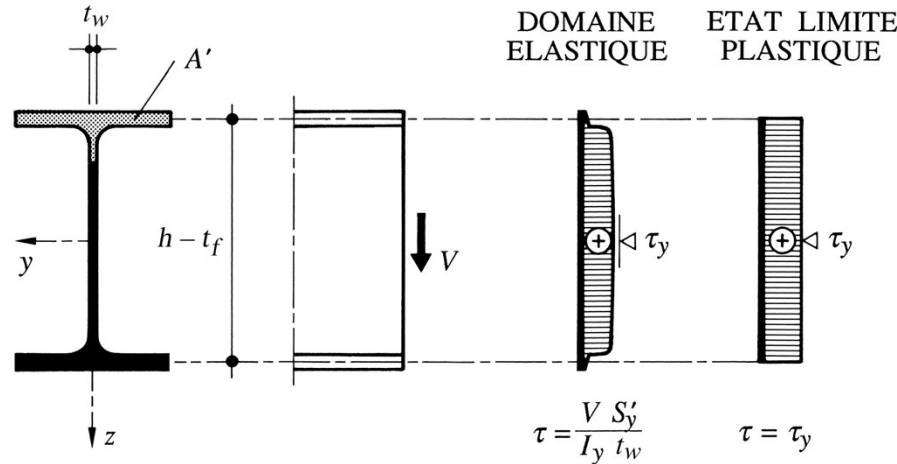
Vérifications en section (EN)

Enveloppes des moments & largeur participante



Résistance à l'effort tranchant (SIA 264 §4.3.2.2)

- Résistance au cisaillement → idem poutre métallique → SIA 263
- Effort tranchant repris par l'âme du profilé en métal
- Interaction M+V, aussi selon SIA 263



$$V_{Rd} = \frac{f_y \cdot A_v}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

Cas profilés ajourés (SZS C5, p.84): approx. avec (A_w – ouverture), ou selon tables producteurs

Stade de construction

Chargements à considérer

TGC 10 § 5.8.3

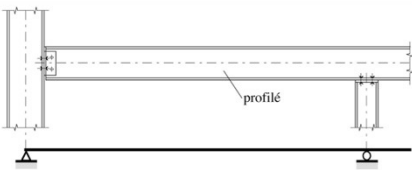

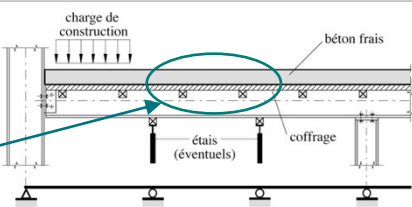

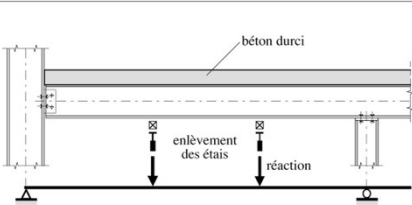

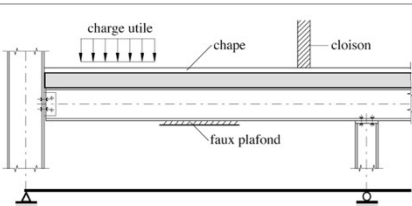

TGC 11 § 10.5.3 et 10.5.4

TGC 11, fig. 10.24: résumé différents stades

Stade de construction

Déversement aile supérieure comprimée au stade de construction !!

Stade final

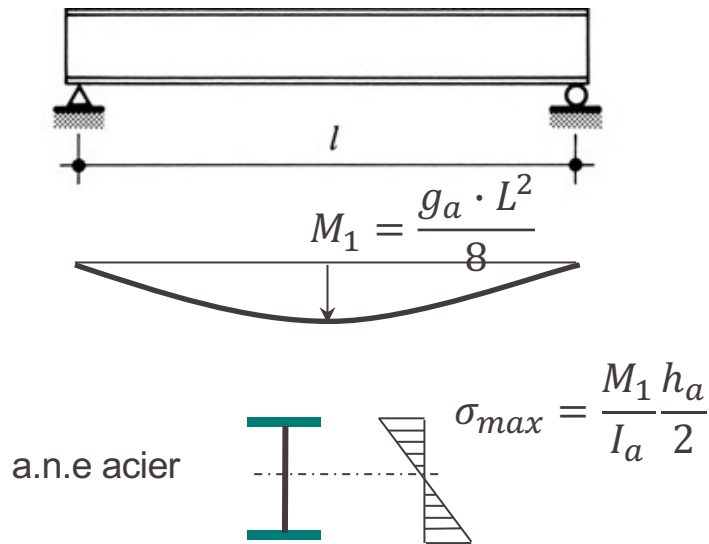
	Structure porteuse Système statique de la poutre	Section résistante	Charges et actions
Stade de construction			<ul style="list-style-type: none"> • Profilé (poids propre)
			<ul style="list-style-type: none"> • Profilé • Coffrage • Béton frais • Charge de construction
Stade définitif			<ul style="list-style-type: none"> • Profilé • Béton durci • Réactions des étais
			<ul style="list-style-type: none"> • Actions permanentes • Charge utile <ul style="list-style-type: none"> - longue durée - courte durée • Actions indirectes

Description stade construction structure mixte

- **ETAPE 1** : Mise en place (à la grue par exemple) du profilé métallique

On raisonne sur une poutre soumise à une flexion positive.

On considère la section la plus sollicitée à mi-travée.



Charge à reprendre :

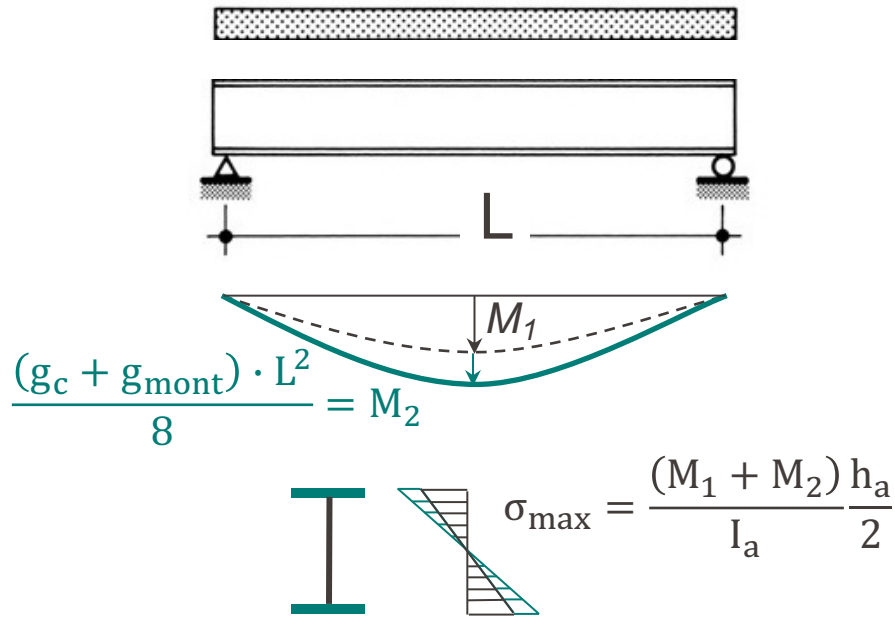
- poids propre du profilé g_a (N/m)

Section résistante :

- acier seul section A_a
- inertie I_a

Description stade de construction structure mixte

■ ETAPE 2 : Bétonnage de la dalle en béton



Charge à reprendre :

- poids propre du coffrage bois, des armatures de béton, du béton mou g_c (N/m)

Section résistante :

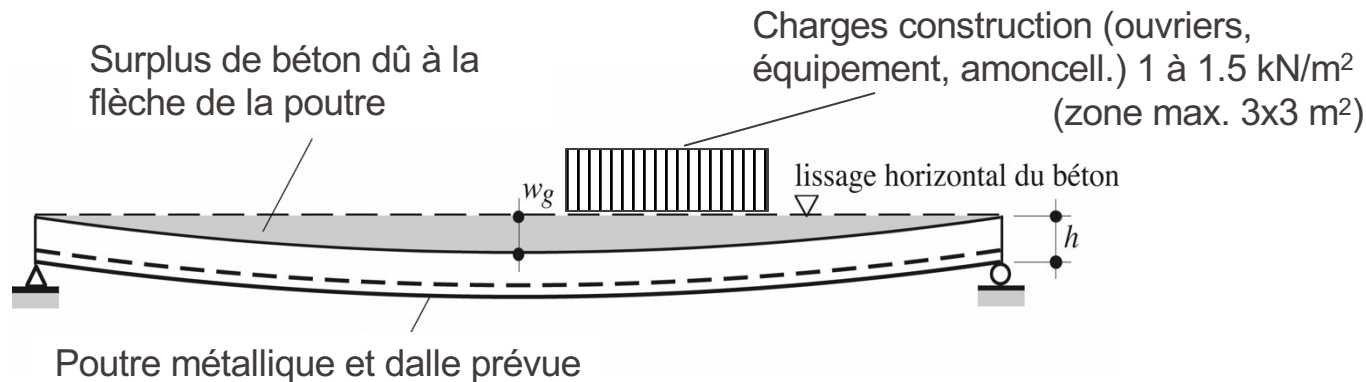
- acier seul section A_a
- inertie I_a

Situation transitoire où le profilé métallique est le plus sollicité.
Calcul EE

Attention au déversement!!!

TGC 11, fig. 6.5: attention aux déformations durant ce stade!

■ ETAPE 2 : Bétonnage de la dalle en béton



En plus contrôle contraintes:

SIA 264 § 5.4.4.4

- Calcul flèche, surplus à considérer si : $w_g \geq h/10$
- Flèche limite (sans surplus): $w(g_a + g_c + (g_{\text{surplus}}) + g_{\text{montage}}) \leq L/300$
- Différences M , w entre charge parabolique et uniforme ?

$$M(L/2)_{\text{para}} = 5g_{\text{surplus}} L^2/48$$

5/6

$$w_{\text{max,para}} = 61g_{\text{surplus}} L^4/(5760EI)$$

61/75

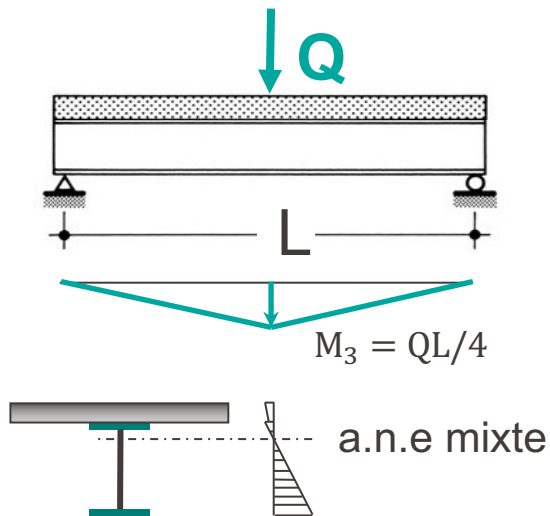
$$\leftrightarrow g_{\text{surplus}} \approx 0.7w_g\rho_c$$

Description stade final structure mixte

- **ETAPE 3: Le béton durcit et devient résistant**

Le comportement de la structure devient **mixte**

- **ETAPE 4: Application des charges d'exploitation**



Charge à reprendre :

- Par ex. charge concentrée Q (N)

Section résistante : acier + béton comprimé

- section $A_b = A_a + (A_s) + A_c / n_{el}$
- Inertie I_b

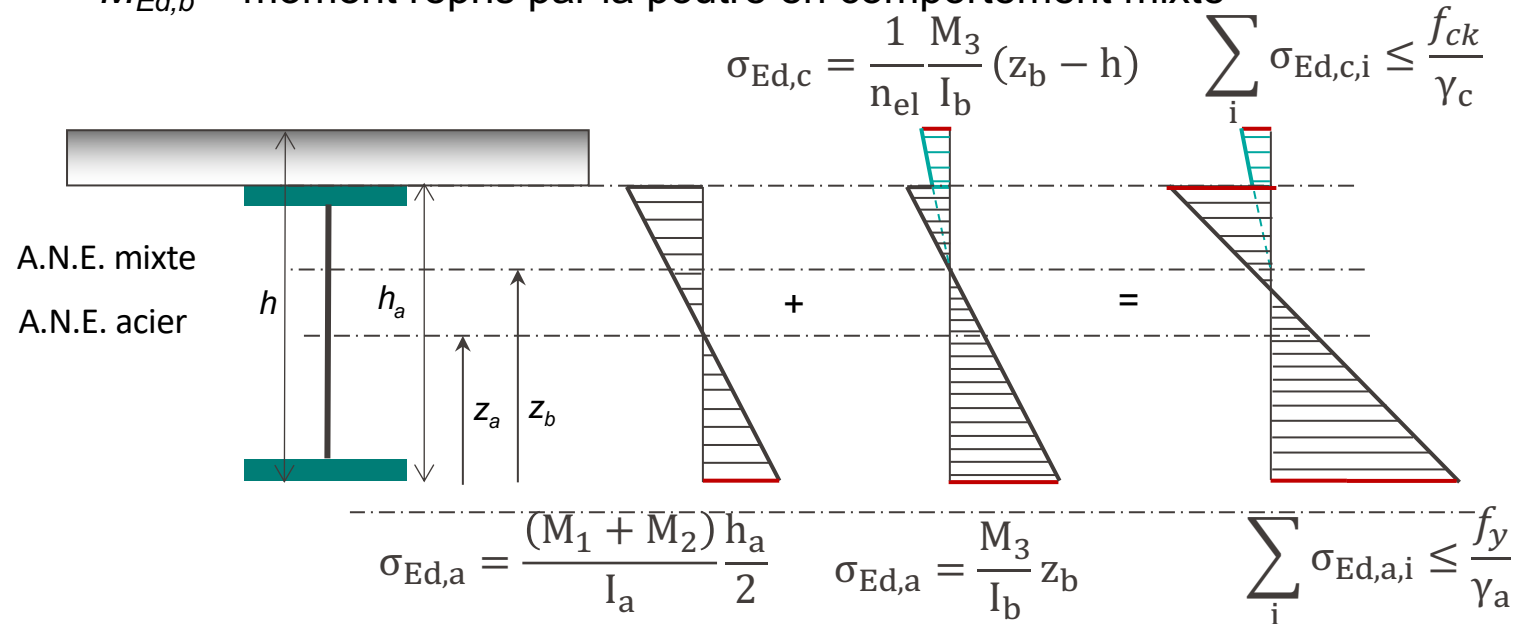
Pour le calcul des flèches et pour le calcul EE:
Valeur du coefficient n_{el} d'équivalence à définir

Addition des stades de construction et final

■ Addition au **stade final élastique**

$M_{Ed,a}$ = moment repris par la poutre en comportement acier seul

$M_{Ed,b}$ = moment repris par la poutre en comportement mixte



Attention: plusieurs diagrammes selon la durée d'application des charges (fct de $n_{el,i}$)

Addition des stades de construction et final

- Addition au **stade final élastique**

$M_{Ed,a}$ = moment repris par la poutre en comportement acier seul

$M_{Ed,b}$ = moment repris par la poutre en comportement mixte

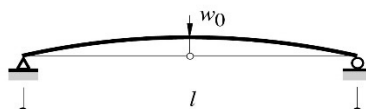

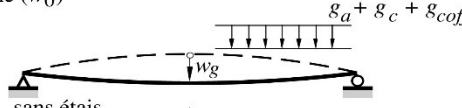

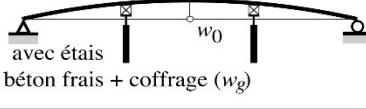
ELU, Contrainte acier:

$$\sigma_{Ed,a} = \frac{M_{Ed,a,1-2}}{I_a} z_a + \sum_i \frac{M_{Ed,b,i}}{I_{b,i}} z_{b,i}$$

Aptitude au service

TGC 11 § 10.5.9

TGC 11, fig. 10.46: Vérification de limites de flèches (élastique)

	Système statique Charges et actions (flèche w)	Section résistante	Exigences Flèches
Stade de construction	 <p>Contreflèche (w_0)</p>		Aspect $w_0 \geq \sqrt{0.025 l} \geq 10 \text{ mm}$
	 <p>sans étais</p>		$w_g = w_1 + w_{31}$
	 <p>avec étais</p> <p>Poutrelle + béton frais + coffrage (w_g)</p>		$w_0 + w_1 + w_{31} \leq \frac{l}{300}$

Indices (selon TGC):

0 = contreflèche

1 = poids propres

2 = poids finitions
(et flèche retrait)

3 = charges utiles

30 = rare

(= courte durée)

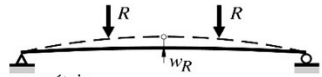

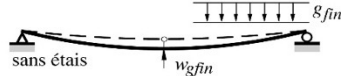

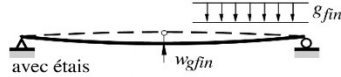
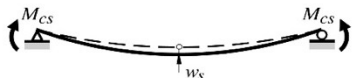

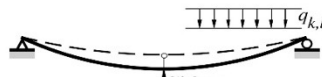

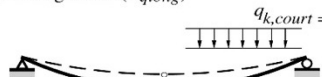

31 = fréquent

(= courte durée)

32 = quasi-permanent

(= longue durée)

TGC 11, fig. 10.46: Vérification de limites de flèches (élastique)

Stade définitif	 <p>avec étais</p> <p>Réactions des étais (w_R)</p>	 <p>$El_b (n_\varphi)$</p>	<p>Aptitude au fonctionnement</p> <p>$w_R = (w_1 + w_2)'$</p> <p>$w_{gfin} = (w_1 + w_2)''$</p> <p>$w_{qcourt} = w_{31}$</p>
	 <p>sans étais</p> <p>w_{gfin}</p>	 <p>$El_b (n_\varphi)$</p>	<p>éléments ductiles</p> <p>$w_0 + w_1 + w_2 + w_{31} \leq \frac{l}{350}$</p>
	 <p>avec étais</p> <p>w_{gfin}</p>		<p>éléments fragiles</p> <p>$w_0 + w_1 + w_2 + w_{30} \leq \frac{l}{500}$</p>
	 <p>Retrait</p> <p>w_s</p>	 <p>$El(n_s)$</p>	<p>Aspect</p> <p>$w_s = w_2''$</p> <p>$w_{qlong} = w_{32}$</p>
	 <p>Charge utile à long terme (w_{qlong})</p> <p>$q_{k, long} = \psi_2 q_k$</p>	 <p>$El_b (n_t)$</p>	<p>$w_0 + w_1 + w_2 + w_{32} \leq \frac{l}{300}$</p>
	 <p>Charge utile à court terme (w_{qcourt})</p> <p>$q_{k, court} = q_k \text{ ou } \psi_1 q_k$</p>	 <p>$El_b (n_0)$</p>	<p>Confort</p> <p>$w_{31} \leq \frac{l}{350}$</p>

$$w_2 = w_2' + w_2'' + w_2'''$$

Addition des stades de construction et final

- Addition au **stade final élastique**

$M_{Ed,a}$ = moment repris par la poutre en comportement acier seul

$M_{Ed,b}$ = moment repris par la poutre en comportement mixte

ELU, Contrainte acier:

$$\sigma_{Ed,a} = \frac{M_{Ed,a,1-2}}{I_a} z_a + \sum_i \frac{M_{Ed,b,i}}{I_{b,i}} z_{b,i}$$

ELS, Flèche:

$$w_{tot} = \frac{\alpha_i \cdot q_{Cd,a,1-2}}{E_a I_a} + \sum_i \frac{\alpha_i \cdot q_{Cd,b,i}}{E_a I_{b,i}}$$

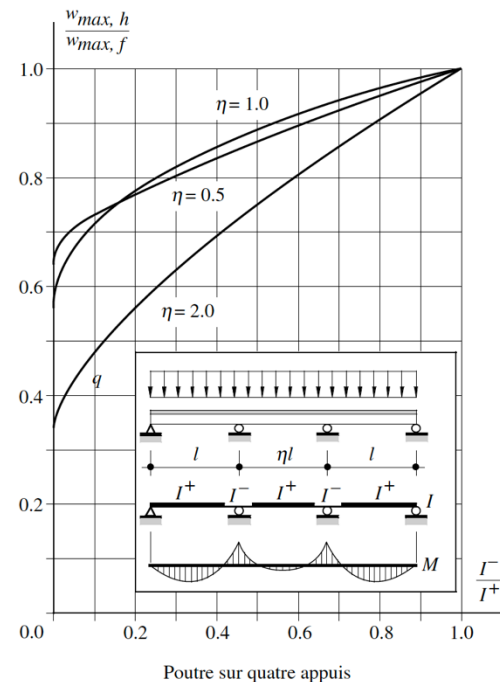
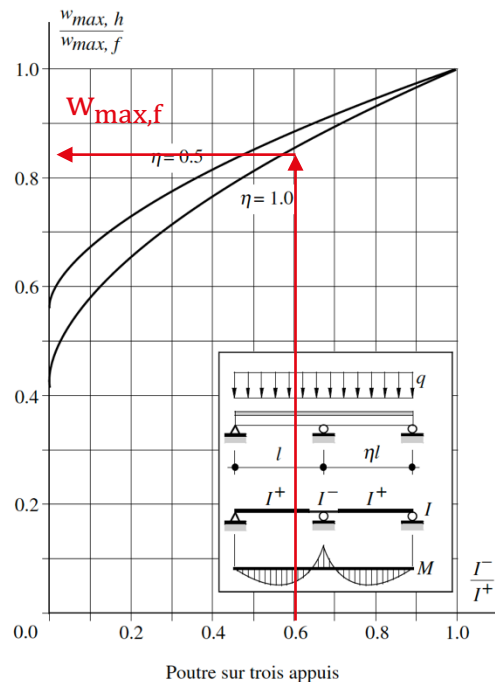
α_i coefficient fct système statique & chargement ($\frac{L^3}{48}$, $\frac{L^4}{384}$, $\frac{5L^4}{384}$,)

Vérification flèches, influence fissuration du béton (TGC11, fig.10.51)

SIA 264 § 4.6.4, § 5.1.3:

- Efforts intérieurs et déformations à ELS
- Méthode de calcul élastique
- Tenir compte fissuration, fluage et retrait du béton.

En outre, tenir compte souplesse connexion, si déterminante
(par ex. connexion partielle).



Chargements particuliers à considérer

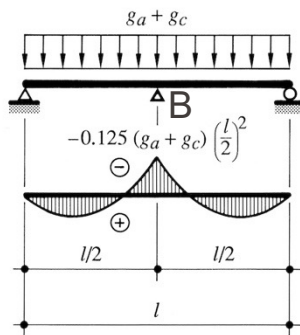
- Etai(s)
- Retrait du béton

TGC 10 § 5.8.3 et 5.8.5

TGC 11 § 10.5.5

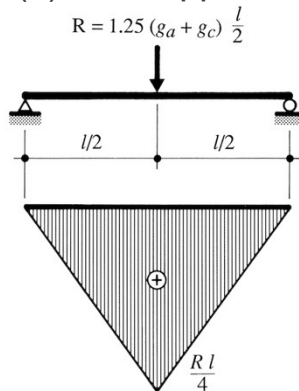
TGC 10, fig. 5.37: construction structure mixte avec/sans étai

(a) Poutre éayée



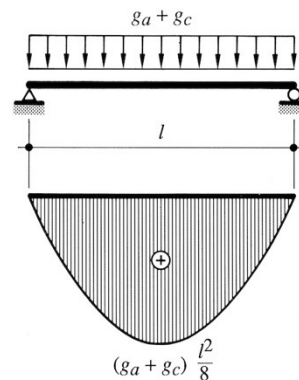
Section résistante
= acier seul

(b) Étai supprimé



Section résistante
= mixte

(c) Stade définitif



Section résistante
= mixte

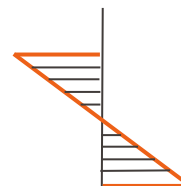
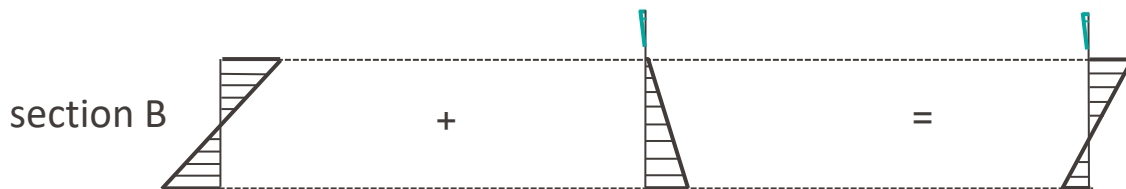
Principe action-réaction

Au final, dans les 2 cas:

$$\sum F_i = 0$$

$$\sum F_i \cdot z_i = M_B$$

Sans étai



Construction structure mixte avec/sans étau

Dans le cas d'une poutre étauée

- Diminution de la flèche lors du bétonnage
- Dans la section à mi-portée, la poutre métallique est moins sollicitée du fait du report d'une partie du poids propre du béton mou sur la poutre mixte. Par ex. :

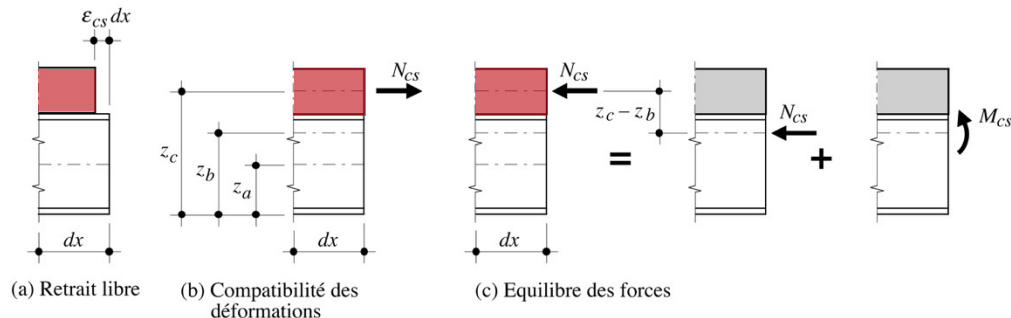
$$M_{a,Ed} = M_1 + M_2 = \frac{0.5(g_a + g_c)L^2}{4} \quad \text{sans étau}$$

$$M_{a,Ed} = - \frac{0.125(g_a + g_c)L^2}{4} \quad \text{avec étau}$$

Phénomène et efforts internes du retrait

- Retrait = action de longue durée d'application
- SIA 262: $\varepsilon_{cs}(\infty) = 0.5\text{‰}$

$$N_{cs,Ed} = \gamma_G \cdot \varepsilon_{cs,\infty} \cdot E_{cs} \cdot A_c \qquad M_{cs,Ed} = N_{cs,Ed} \cdot \left(h - \frac{h_c}{2} - z_b\right)$$

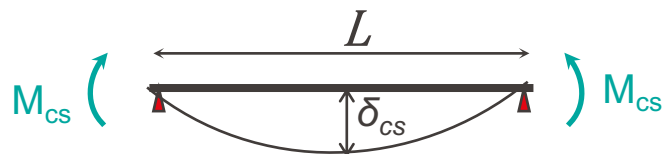


État de contraintes auto-équilibrées

Syst. isostatiques M_{Ed}
(retrait) = 0

Mais déformations verticales

- Le moment interne dû au retrait M_{cs} crée une flèche (important pour vérifier l'aptitude au service).

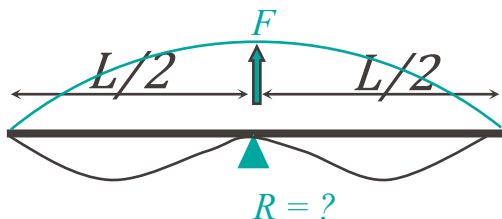


$$\delta_{cs} = \frac{M_{cs} \cdot L^2}{8E_a I_{mixte}}$$

- Cas d'une poutre hyperstatique, poutre sur 3 appuis :

TGC11 Fig. 10.49

L'appui intermédiaire empêche la formation de la flèche attendue si la poutre était isostatique. Création d'un moment hyperstatatique de retrait.



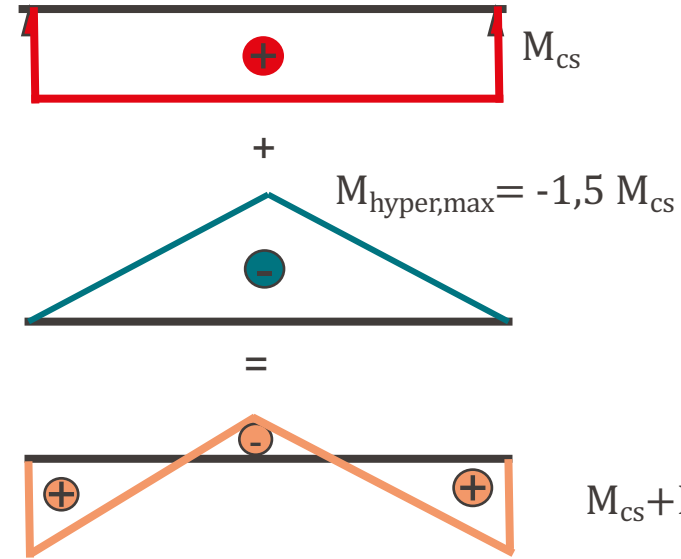
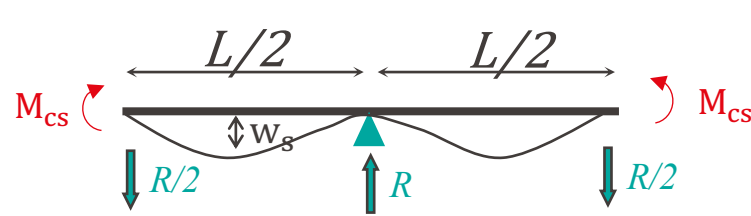
Appui permanent (pas un étai)

$$\delta_{F,mi-portée} = -\frac{F \cdot L^3}{48E_a I_{mixte}} = -\delta_{cs}$$

$$R = \frac{6 \cdot M_{cs}}{L}$$

Calculs flèches et moments dans une poutre mixte

- Cas d'une poutre hyperstatique, poutre sur 3 appuis :



- Flèches: (TGC11, eq.10.104 à 10.106)

pour une poutre simple:

$$w_s = \frac{M_{cs} l^2}{8 E_a I_{b,h}}$$

pour une poutre sur trois appuis:




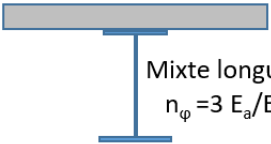

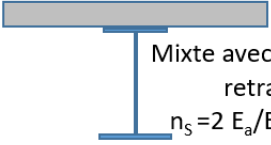
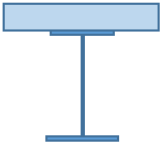
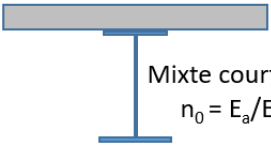
$$w_s \cong \frac{M_{cs} l^2}{27 E_a I_{b,h}}$$

pour la travée de rive d'une poutre sur quatre appuis et plus:

$$w_s \cong \frac{M_{cs} l^2}{20 E_a I_{b,h}}$$

Annexes

Rappel: section résistante \Leftrightarrow action

Modèle équivalent	Section résistante	Actions
<p>Modèle 0</p> 	<p>Acier seul</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -poids propre de la poutre métallique -poids propre du béton frais -charge de montage
<p>Modèle 1</p> 	<p>Mixte longue durée</p> <p>$n_{\phi} \approx 3 E_a/E_{cm} = 18$</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Revêtement -Glissière -Fluage
<p>Modèle 2</p> 	<p>Mixte avec effet du retrait</p> <p>$n_5 = 2 E_a/E_{cm} = 12$</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Effort normal dû au retrait N_{cs} -Moment dû au retrait M_{cs}
<p>Modèle 3</p> 	<p>Mixte courte durée</p> <p>$n_0 = E_a/E_{cm} = 6$</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Trafic (Q_k et q_k) -Température

Calcul efforts intérieurs M_{Ed} SELON TGC 12, chap. 13⁴⁵

Inertie peut changer le long de la poutre (section acier variable, b_{eff} variable, fissuration sur appuis interm.)

Méthode 1:

- Une seule analyse: calcul élastique des efforts avec en tenant compte participation béton tendu partout, avec $I_{b,h,cte}$ (bâtiment) ou $I_{b,h,variable} = fct(A_a, b_{eff})$
- Redistribution forfaitaire r % des appuis interm. vers travées (fct classe section appui)
- Seulement pour actions agissant après réalisation liaison.

Méthode 2a:

- 1^{ère} analyse: calcul élastique des efforts avec en tenant compte participation béton tendu partout
- Sous cas de charge caractéristique ELS (cas charge rare), y.c. effets à long terme
- Dans zones M-, longueurs L_{fiss} où $\sigma_{Ed,c} > 2f_{ctm}$, inerties sections fissurées
- 2^{ème} analyse: calcul élastique des efforts avec $I_{variable}$ et sections fissurées.

Méthode 2b:

- Dalle béton coulée en place: une analyse avec $L_{fiss} = 15\%$, calcul élastique des efforts $I_{b,I}$ et $I_{b,II}$ (limite $L_{min}/L_{max} > 0.6$).

1^{ère} analyse

