



Calcul des Ponts Mixtes Acier – Béton selon les Eurocodes

Flexion Longitudinale

*EC4 EN 1994 - 1-1 : Règles Générales et Règles
pour les Bâtiments*

*EC4 EN 1994 – 2 : Ponts Routiers
et Ponts Ferroviaires*

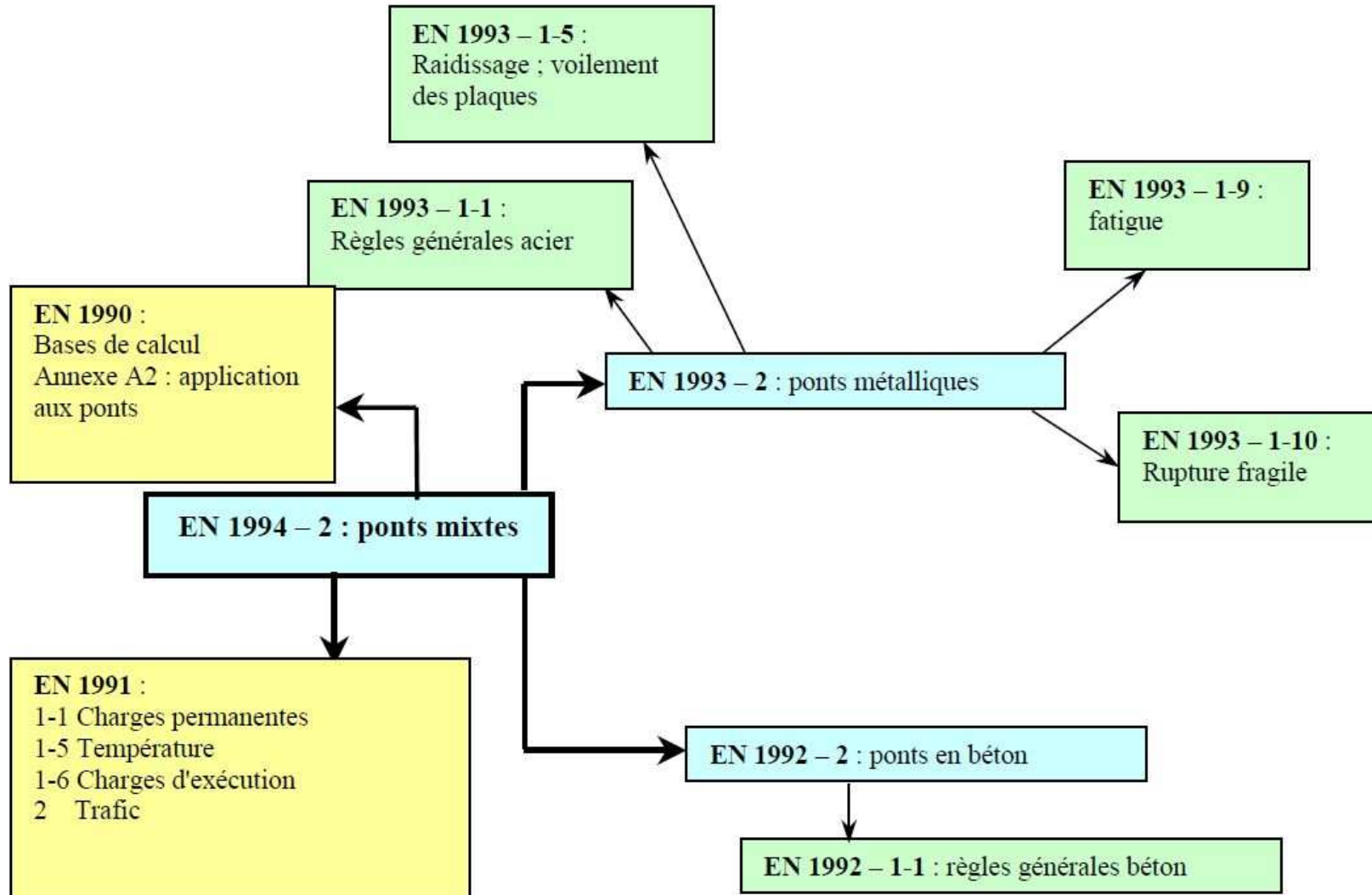
[Intro_Const-Mixte_Ponts.ppt#100. Ponts Mixtes Ferroviaires des Lignes Grande Vitesse](#)

Christophe PEYRE

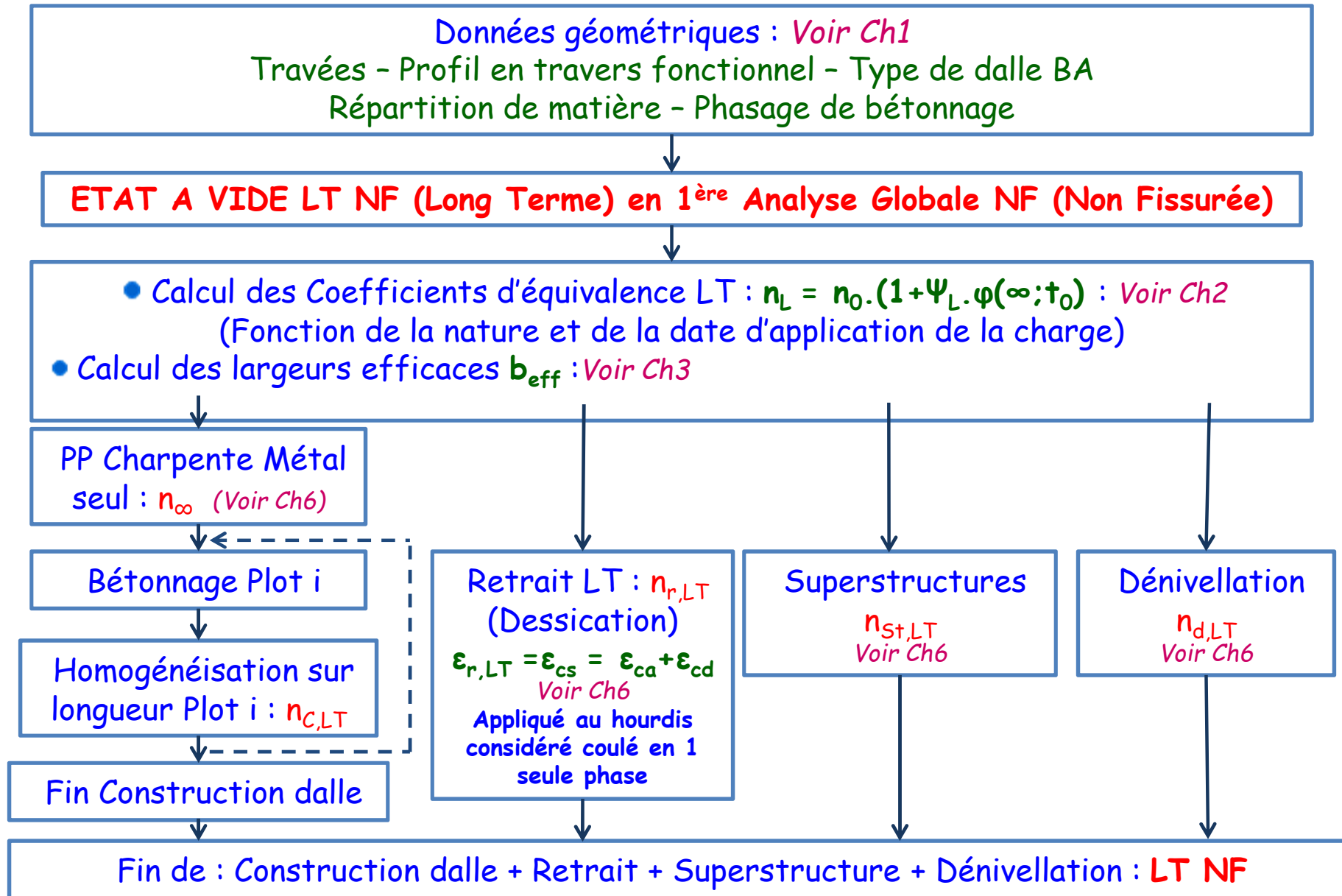
IUT de Nîmes

Organigramme général de calcul des Ponts Mixtes Acier - Béton

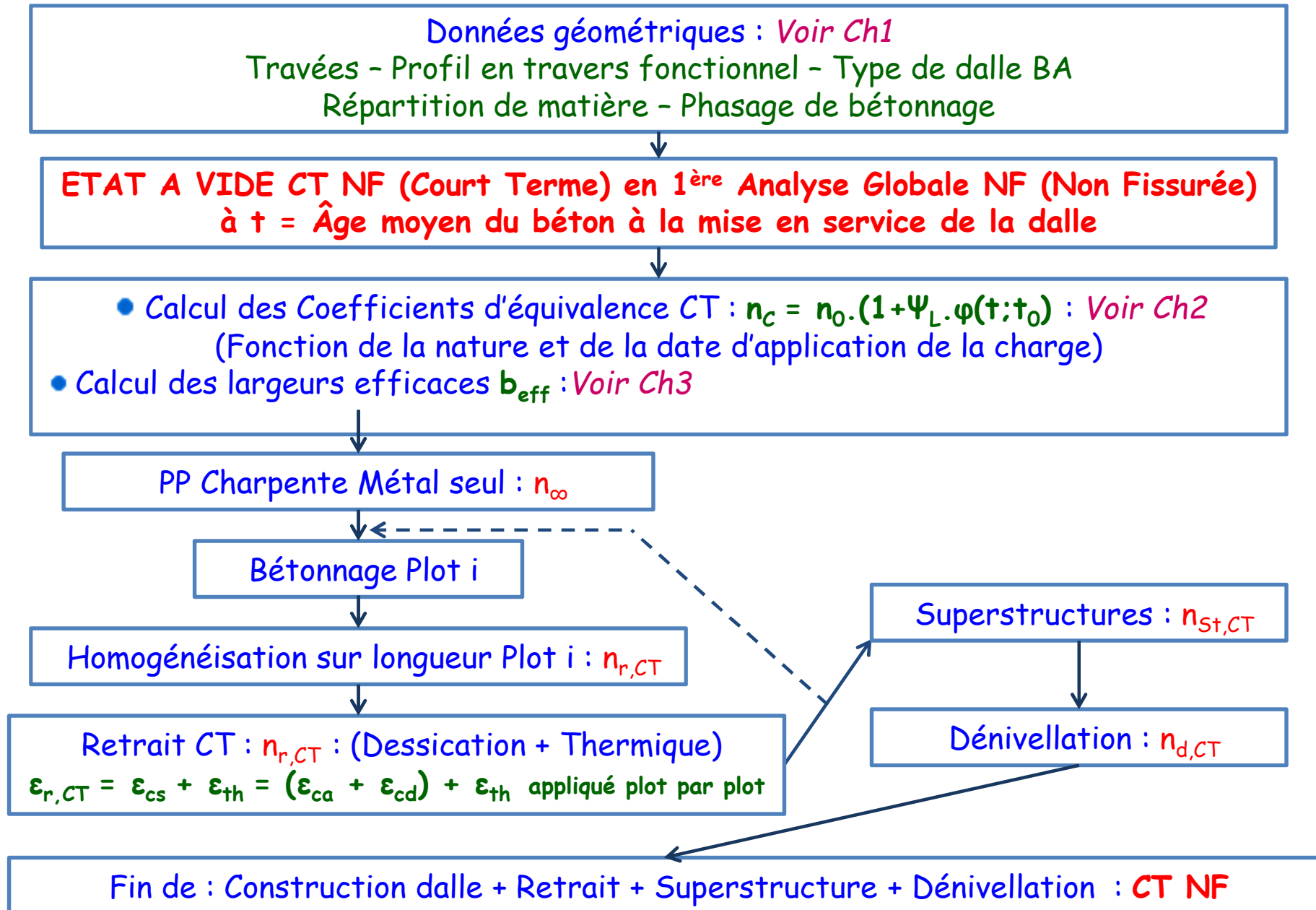
■ Texte directeur : *EC4 - Partie 2* et priorités d'appel des textes entre eux



Organigramme de calcul des sollicitations à l'ELS Caractéristique



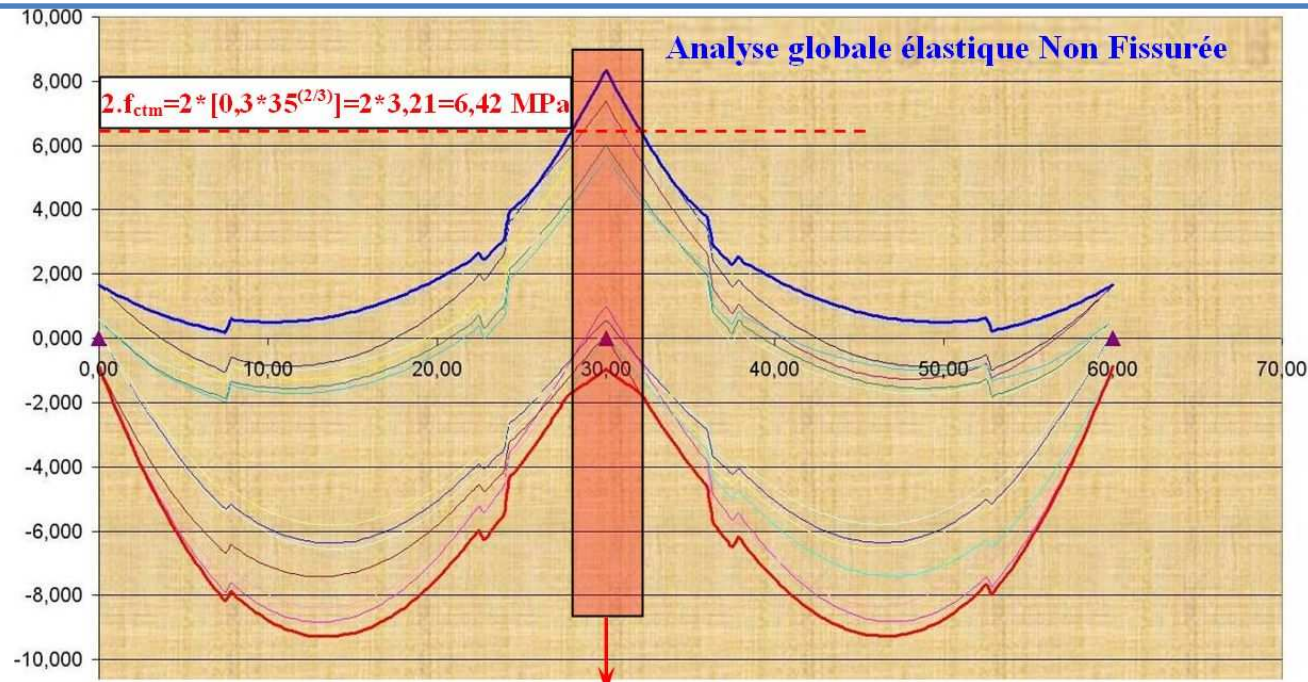
Organigramme de calcul des sollicitations à l'ELS Caractéristique



■ Organigramme de calcul des sollicitations à l'ELS Caractéristique

ETAT A VIDE Analyse Globale NF
= Enveloppes (Enveloppes ETAT A VIDE LT NF; Enveloppes ETAT A VIDE CT NF)

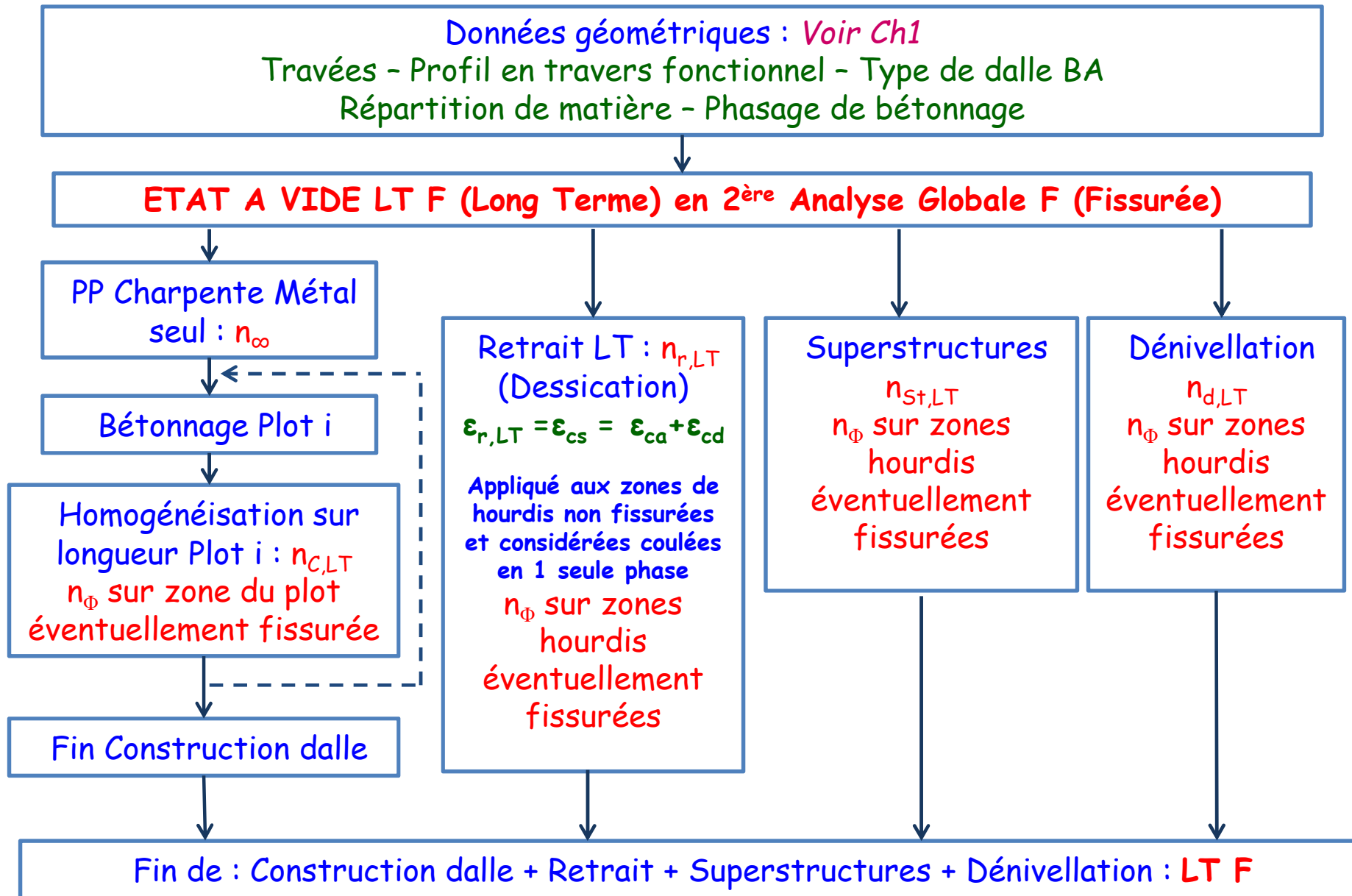
Calcul des longueurs fissurées de dalle sur chaque appui intermédiaire



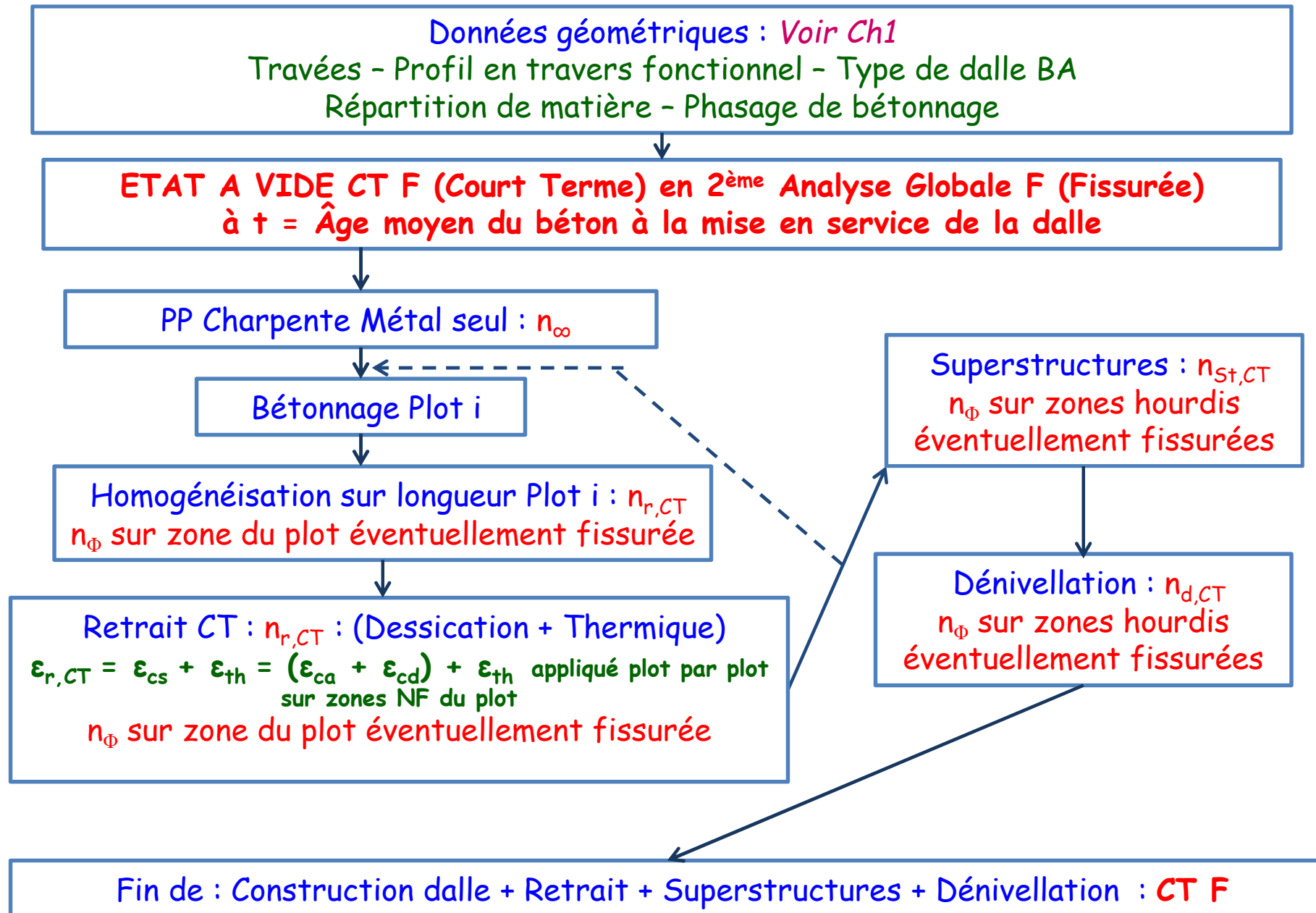
Zone fissurée → Neutralisée en 2^{ème} Analyse « Fissurée »

Recalcul complet de l'Etat à Vide LT - CT
Les caractéristiques mécaniques deviennent les caractéristiques fissurées dans les zones fissurées du hourdis déterminées ci-dessus : n_{Φ}

Organigramme de calcul des sollicitations à l'ELS Caractéristique



Organigramme de calcul des sollicitations à l'ELS Caractéristique



■ Organigramme de calcul des sollicitations à l'ELS Caractéristique

ETAT A VIDE Analyse Globale F
 = Enveloppes (Enveloppes ETAT A VIDE LT F ; Enveloppes ETAT A VIDE CT F)

Actions variables d'Exploitations Routières : *Voir Ch7*
 EN 1991 - Partie 2 : Actions sur les ponts dues au trafic
 ou Ferroviaires : EN 1991 - Partie 2 : Actions du trafic ferroviaire

Actions variables Thermiques : *Voir Ch8* : EN 1991 - Partie 1-5 : Actions sur
 les ponts - Actions Thermiques : Gradients Thermiques

■ Combinaisons finales ELS Caractéristique (Flexion longitudinale)
 ■ Enveloppes finales ELS Caractéristique : *Voir Ch9*

$\sum_{j \geq 1} G_{kj, \text{sup}} \left(\text{ou } \sum_{j \geq 1} G_{kj, \text{inf}} \right) + S + D :$ } Enveloppes Etat à Vide Fissuré

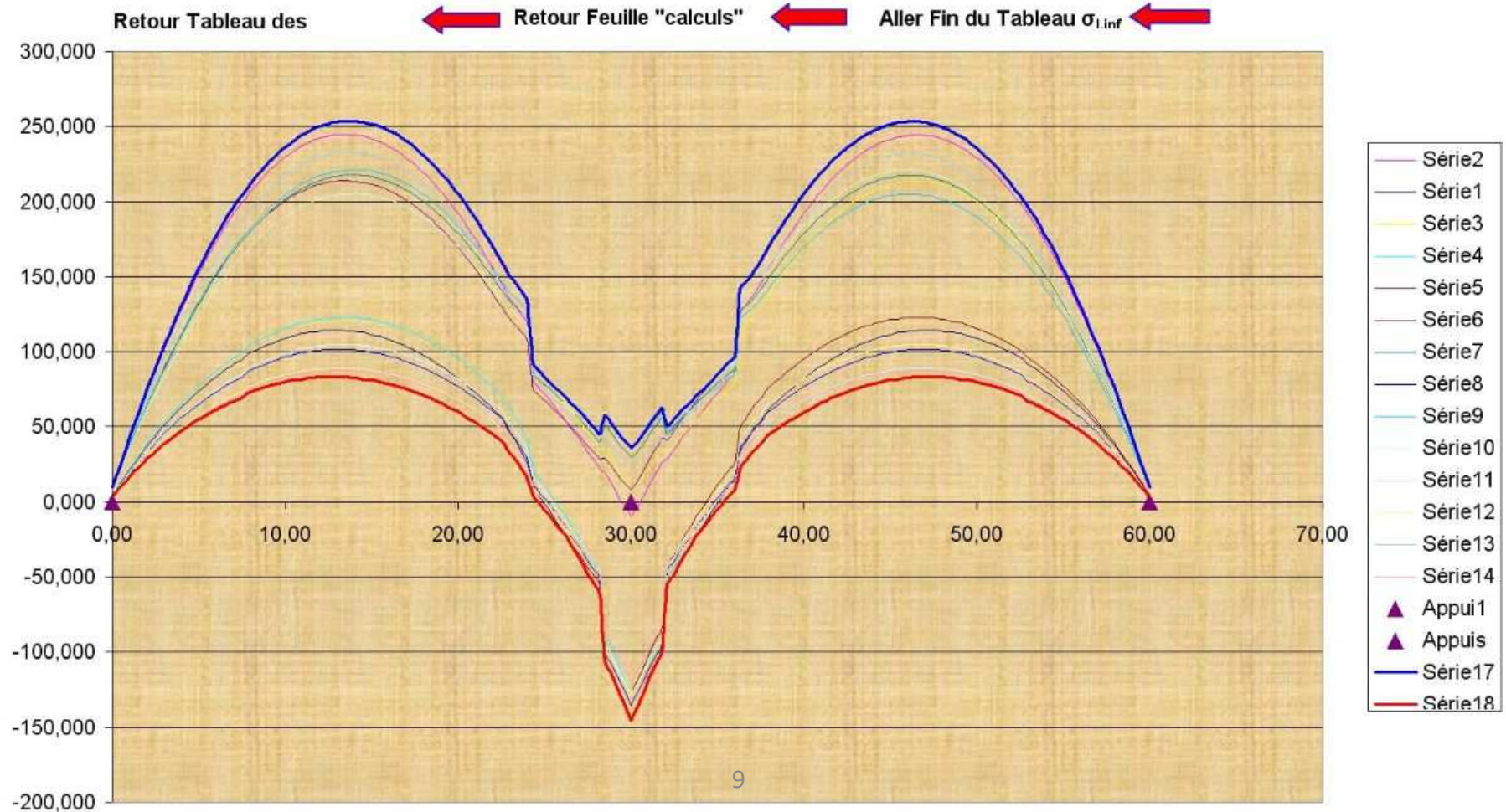
$$\begin{aligned}
 &+ g_{r1a}(\text{UDL}_k + \text{TS}_k + q_{fk}^*) + 0,6.T_k \\
 &+ g_{r1a}(\text{UDL}_k + \text{TS}_k + q_{fk}^*) + 0,6.F_{wk, \text{Trafic}} \\
 &+ g_{1b}(\text{LM2}) \\
 &+ g_{r2}(0,4.\text{UDL}_k + 0,75.\text{TS}_k + Q_{lk} + Q_{tk}) + 0,6.T_k \\
 &+ g_{r3}(q_{fk}) + 0,6.T_k \\
 &+ g_{r4}(\text{LM4} + q_{fk}) + 0,6.T_k \\
 &+ g_{r5}(1,1. \delta_{\text{dyn}}.\text{LM3} + 0,4.\text{UDL}_k + 0,75.\text{TS}_k) + 0,6.T_k \\
 &+ T_k + g_{r1a}(0,4.\text{UDL}_k + 0,75.\text{TS}_k + 0,4.q_{fk}^*) \\
 &+ F_{wk}
 \end{aligned}$$

} Actions Variables

■ Organigramme de calcul des sollicitations à l'ELS Caractéristique

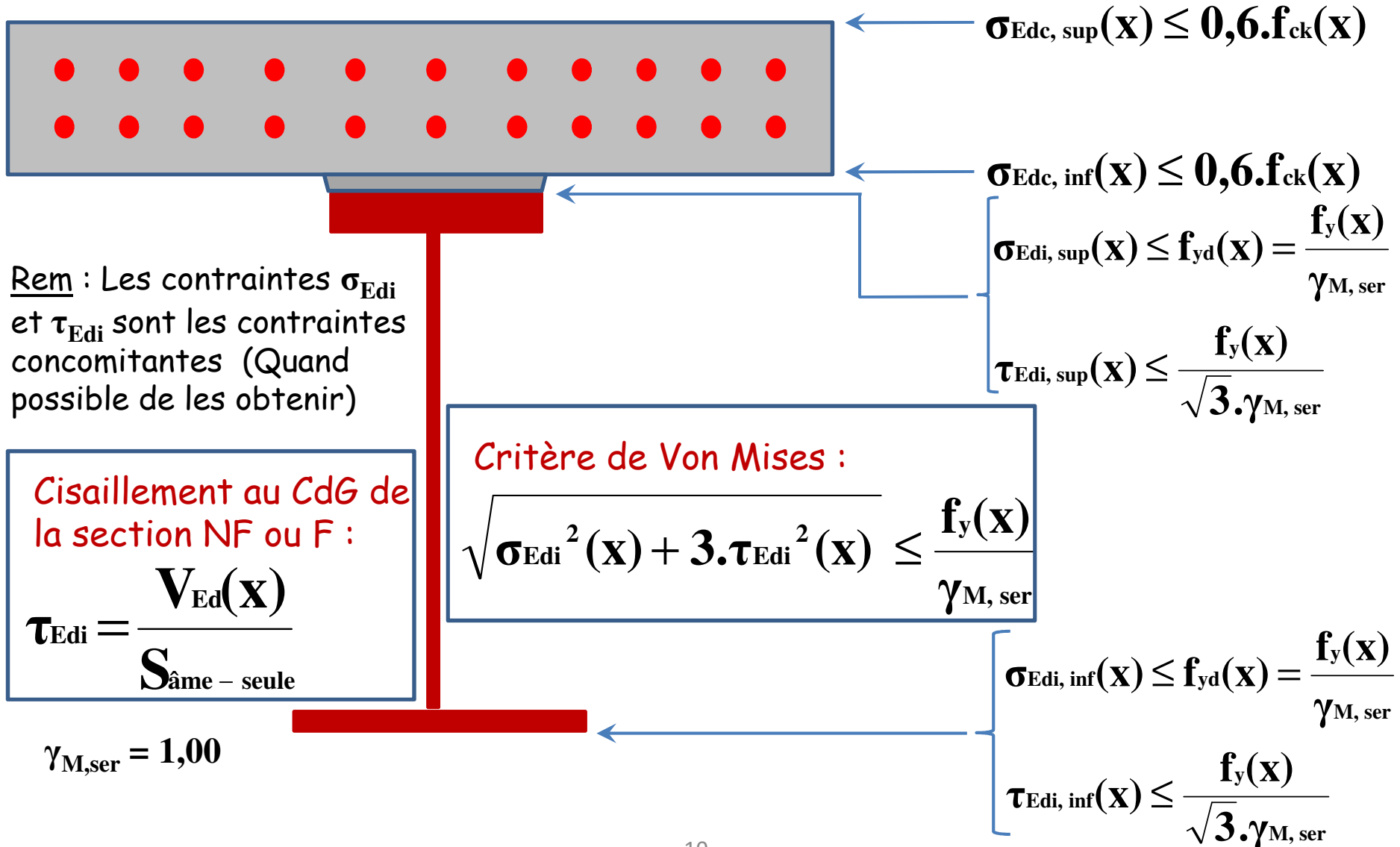
- Combinaisons finales ELS Caractéristique (Flexion longitudinale)
 - Enveloppes finales ELS Caractéristique : *Voir Ch9*
 - *Sur Fibre Inférieure PRS par exemple*

Graphes Enveloppe des Contraintes en **Fibre INF. PRS** pour différentes Combinaisons de Cas de Charges (MPa)



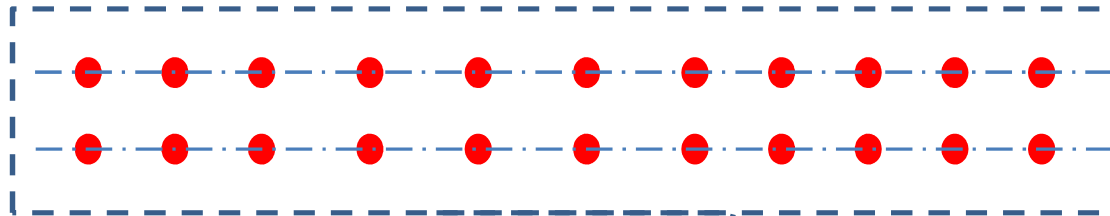
Justification des sections en flexion longitudinale à l'ELS CARA

Section sous moment $M_{k,Ed}(x) > 0$



Justification des sections en flexion longitudinale à l'ELS CARA

Section sous moment $M_{k,Ed}(x) < 0$



$$\sigma_{Eds, sup}(\mathbf{X}) \leq 0,8.f_{sk}$$

$$\sigma_{Eds, inf}(\mathbf{X}) \leq 0,8.f_{sk}$$

Rem : Les contraintes σ_{Edi} et τ_{Edi} sont les contraintes concomitantes (Quand possible de les obtenir)

$$\sigma_{Edi, sup}(\mathbf{X}) \leq f_{yd}(\mathbf{X}) = \frac{f_y(\mathbf{X})}{\gamma_{M, ser}}$$

$$\tau_{Edi, sup}(\mathbf{X}) \leq \frac{f_y(\mathbf{X})}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M, ser}}$$

Cisaillement au CdG de la section NF ou F :

$$\tau_{Edi} = \frac{V_{Ed}(\mathbf{X})}{S_{\hat{a}me - seule}}$$

$$\gamma_{M, ser} = 1,00$$

Critère de Von Mises :

$$\sqrt{\sigma_{Edi}^2(\mathbf{X}) + 3 \cdot \tau_{Edi}^2(\mathbf{X})} \leq \frac{f_y(\mathbf{X})}{\gamma_{M, ser}}$$

$$\sigma_{Edi, inf}(\mathbf{X}) \leq f_{yd}(\mathbf{X}) = \frac{f_y(\mathbf{X})}{\gamma_{M, ser}}$$

$$\tau_{Edi, inf}(\mathbf{X}) \leq \frac{f_y(\mathbf{X})}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M, ser}}$$

■ Respiration de l'âme à l'ELS FREQUENT (EC4 – 2 §7.2.3 et EC3 – 2 §7.4)

■ A chaque passage de véhicules sur le pont, l'âme se déforme légèrement hors de son plan, suivant l'allure de la déformée du premier mode critique, avant de revenir à sa position initiale

➔ Cette déformation répétée, appelée « **respiration de l'âme** », est susceptible de générer des fissures de fatigue à la jonction âme/semelle

➔ Pour les âmes dépourvues de raidisseurs longitudinaux ou pour un sous-panneau d'âme raidie, les risques de respiration de l'âme sont négligeables si :

$$\frac{h_w}{t_w} \leq \min[30 + 4.L ; 300] \quad \text{Avec } L = \text{Longueur de la travée en m et } L \geq 20\text{m}$$

■ De façon générale, ce critère est largement satisfait pour les ponts routiers

■ A défaut, l'**EN1993-2** définit tout de même un critère plus précis à partir des contraintes critiques de voilement de l'âme non raidie ou d'un sous-panneau, sous combinaison ELS fréquente :

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed,ser}}{\sigma_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{1,1 \cdot \tau_{x,Ed,ser}}{\tau_{cr}}\right)^2} \leq 1,1$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t_w^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot h_w^2} : \text{Contrainte critique d'Euler}$$

$\sigma_{cr} = k_\sigma \cdot \sigma_E$: Contrainte critique de voilement élastique

k_σ : Coefficient de voilement (**EC3 1-5 Tab 4.1**)

$\tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_E$: Contrainte critique de voilement par cisaillement

k_τ : Coefficient de voilement par cisaillement (**EC3 1-5 Annexe A.3**)

■ Justification des sections en flexion longitudinale à l'ELU

Selon l'**EN1994-2, 6.1.1**, une section mixte doit être vérifiée à l'ELU vis-à-vis de :

- ❑ La **résistance en section** : **EN1994-2, 6.2.1 et 6.2.2**
- ❑ La résistance au **voilement par cisaillement** : **EN1994-2, 6.2.2**
- ❑ La résistance au **lancement** : **EN1994-2, 6.5**
- ❑ La résistance au **glissement** (Connexion) : **EN1994-2**
- ❑ La résistance en **fatigue** : **EN1994-2**
- ❑ La résistance au **déversement** (**EN1994-2, 6.4**) de la membrure inférieure comprimée dans son ensemble
 - Bien qu'il s'agisse d'une instabilité, celle-ci doit être vérifiée

■ Résistance en section : Classification des sections à l'ELU

- ❑ L'**EN1993-1-1, 5.5** introduit le concept de "**classes de section transversale**" qui permet de préjuger de la résistance ultime en flexion et en compression des sections en acier de construction compte tenu du **risque de voilement local**
- ❑ Les sections sont classées de 1 à 4, en fonction de l'élançement (largeur/épaisseur, noté c/t) des différentes parois comprimées qui les composent, de leur limite d'élasticité et des contraintes sollicitantes à l'ELU :

■ Classes des sections en flexion longitudinale à l'ELU

- **Classe 1** : Section transversale massive pouvant atteindre sa résistance plastique sans risque de voilement et possédant une réserve plastique suffisante pour introduire dans la structure une rotule plastique susceptible d'être prise en compte dans une analyse globale plastique
- **Classe 2** : Section transversale massive pouvant atteindre sa résistance plastique sans risque de voilement, mais ne possédant pas de réserve plastique suffisante pour introduire une éventuelle rotule plastique dans l'analyse globale
- **Classe 3** : Section transversale pouvant atteindre sa résistance élastique, mais pas sa résistance plastique à cause des risques de voilement
- **Classe 4** : Section transversale à parois élancées ne pouvant atteindre sa résistance élastique à cause des risques de voilement

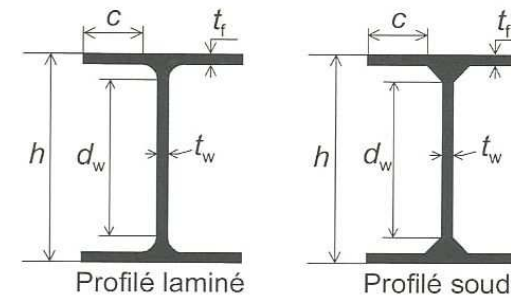
Justification des sections en flexion longitudinale à l'ELU

CLASSE	MODELE DE COMPORTEMENT	RESISTANCE DE CALCUL	CAPACITE DE ROTATION PLASTIQUE
1		PLASTIQUE sur section complète 	Importante
2		PLASTIQUE sur section complète 	Limitée
3		ELASTIQUE sur section complète 	Aucune
4		ELASTIQUE sur section incomplète 	Aucune

Tableau 8.1 : Principe de classification des sections (cas de la flexion simple)

Remarque

On notera qu'une section mixte peut changer de classe quand le moment fléchissant change de signe ; par exemple, pour une poutre continue de bâtiment, une section de classe 1 en zone de moments positifs peut être couramment de classe 2 ou 3 en zone de moments négatifs.



Notations pour la classification des sections.

■ Détermination de la Classe d'une section à l'ELU (EN 1994-2 5.5.1(1))

- La classe d'une section mixte est la classe la plus élevée des parois comprimées en acier qui la composent
 - Le voilement local ne peut être provoqué que par des contraintes de compression
 - Toute paroi soumise uniquement à de la traction est obligatoirement de classe 1 quel que soit son élancement
 - Si une paroi est de classe n sous compression uniforme, alors elle est forcément de classe $m \leq n$ pour tout autre cas de sollicitation qui ne peut que diminuer les efforts de compression
 - Si les connecteurs respectent les espacements définis dans l'**EN1994-2 6.6.5.5**, alors une semelle comprimée en acier connectée à une dalle en béton est de classe 1
-
- Pour classer une **paroi interne** (c'est à dire une paroi bordée par 2 autres parois perpendiculaires qui la stabilisent sur ses bords) comme une âme de poutre en I ou un sous-panneau de fond de caisson, on utilise le **tableau 5.2, feuille 1/3, de l'EN1993-1-1**
 - Pour classer une **paroi en console** (c'est à dire une paroi bordée d'un seul côté) comme une moitié de semelle de poutre en I, on utilise le **tableau 5.2, feuille 2/3, de l'EN1993-1-1**

Détermination de la Classe d'une section à l'ELU (EN 1994-2 5.5.1(1))

Table 5.2 (Feuille 1 sur 3): Rapports largeur-épaisseur maximaux pour les parois comprimées

Parois comprimées internes						
Axe de flexion		Axe de flexion				
Classe	Paroi fléchie	Paroi comprimée	Paroi fléchie et comprimée			
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	lorsque $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ lorsque $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	lorsque $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ lorsque $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$			
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$	lorsque $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ lorsque $\psi \leq -1^*$: $c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y (N/mm ²)	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

* $\psi \leq -1$ est à considérer lorsque soit la contrainte de compression $\sigma < f_y$, soit la déformation de traction $\epsilon_y > f_y/E$.

Tableau 5.2 (Feuille 2 sur 3): Rapports largeur-épaisseur maximaux pour les parois comprimées

Semelles en console						
Sections laminées		Sections soudées				
Classe	Paroi comprimée	Paroi fléchie et comprimée				
		Extrémité comprimée	Extrémité tendue			
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$				
Pour k_σ , voir la Partie 1-5						
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y (N/mm ²)	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

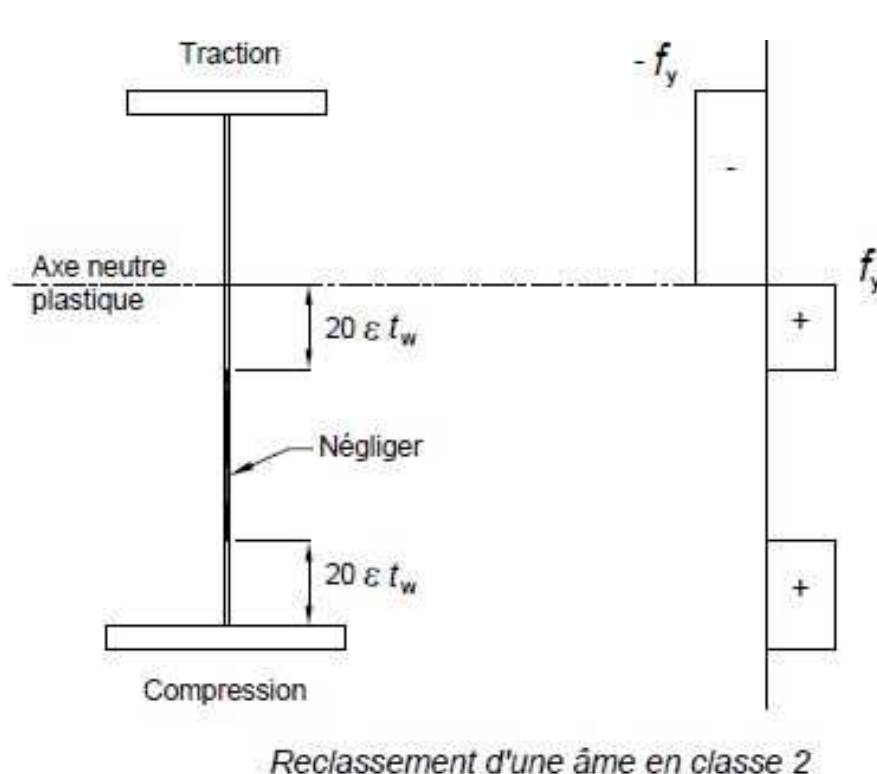
■ Détermination de la Classe d'une section à l'ELU (EN 1994-2 5.5.1(1))

Ces tableaux fournissent les élancements limites entre les classes
Pour déterminer la classe d'une paroi d'une section donnée :

- ✓ On suppose que cette paroi est de classe 1 ou 2
 - Elle peut alors être calculée en plasticité
 - La position de l'axe neutre plastique (ANP) de la section permet de déterminer l'élancement limite de cette paroi (entre classe 2 et classe 3), et de valider cette hypothèse de plasticité
 - Si ce n'est pas le cas, le diagramme élastique des contraintes de l'ELU (issu de l'analyse globale fissurée et tenant compte du phasage de construction de la structure) permet de déterminer l'élancement limite de la classe 3
 - Si celui-ci est dépassé à son tour, la paroi étudiée est de classe 4
EN1993-1-1, tableau 5.2

■ Détermination de la Classe d'une section à l'ELU (EN 1994-2 5.5.1(1))

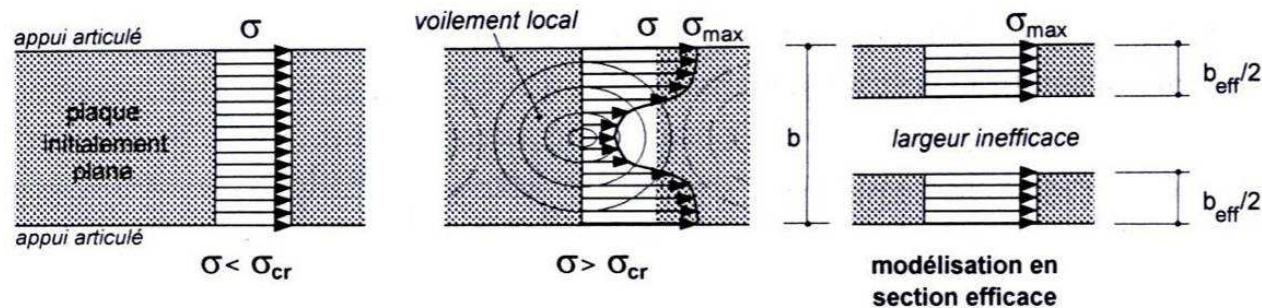
- L'**EN1994-2** permet de reclasser une section en I dont les semelles sont de classe 1 ou 2 et l'âme de classe 3
- Cela permet alors de justifier la section en plasticité
- Le moment résistant plastique est alors déterminé en limitant les hauteurs d'âme comprimée à $20 \cdot \epsilon \cdot t_w$
- C'est-à-dire en supprimant la zone d'âme susceptible de voiler
EN1994-2, 5.5.2(3)



Voir hypothèse de « Von Karman » [page suivante](#)

■ Détermination de la Classe d'une section à l'ELU (EN 1994-2 5.5.1(1))

- Soit une paroi mince rectangulaire initialement plane, articulée sur ses appuis longitudinaux et suffisamment allongée pour négliger les effets d'extrémités
 - Cette paroi est soumise à un effort de compression donnant lieu à une contrainte de compression uniforme σ
- Dans le domaine post-critique ($\sigma > \sigma_{cr}$), et dans la zone de voilement, un nouveau diagramme de contraintes se met en place dans lequel les fibres centrales les plus cintrées par le voilement sont soulagées au détriment des fibres situées proches des appuis dont la contrainte est majorée pour pouvoir continuer à équilibrer la sollicitation globale qui n'a pas varié
 - Ainsi, le diagramme des contraintes normales se creuse d'autant plus que l'effort appliqué augmente → la contrainte près des appuis de bord atteint une valeur maximale notée σ_{max}



Principe des largeurs efficaces

■ Détermination de la Classe d'une section à l'ELU (EN 1994-2 5.5.1(1))

- Les sections de classe 1 ou 2 peuvent être justifiées en plasticité ou en élasticité
- Les sections de classe 3 sont justifiées en élasticité, éventuellement reclassées en classe 2 efficace et justifiées en plasticité
- Les sections de classe 4 sont aussi justifiées en élasticité, mais avec un calcul conduit sur une section efficace, réduite pour tenir compte du risque de voilement
- On note enfin que, quelle que soit sa classe, une section peut toujours être justifiée par une analyse non linéaire très générale

■ Détermination de la Classe d'une section à l'ELU (EN 1994-2 5.5.1(1))

- La position de l'axe neutre plastique (ANP) ainsi que le moment résistant plastique $M_{pl,Rd}$ sont calculés en considérant les résistances plastiques suivantes pour les matériaux :
 - Acier de charpente (traction ou compression) : $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{M0}$
 - Armatures passives (traction) : $f_{sd} = f_{sk} / \gamma_S$
 - Béton (compression) : $0,85.f_{cd} = 0,85.f_{ck} / \gamma_C$
 - La résistance du béton tendu et celle des armatures comprimées sont négligées

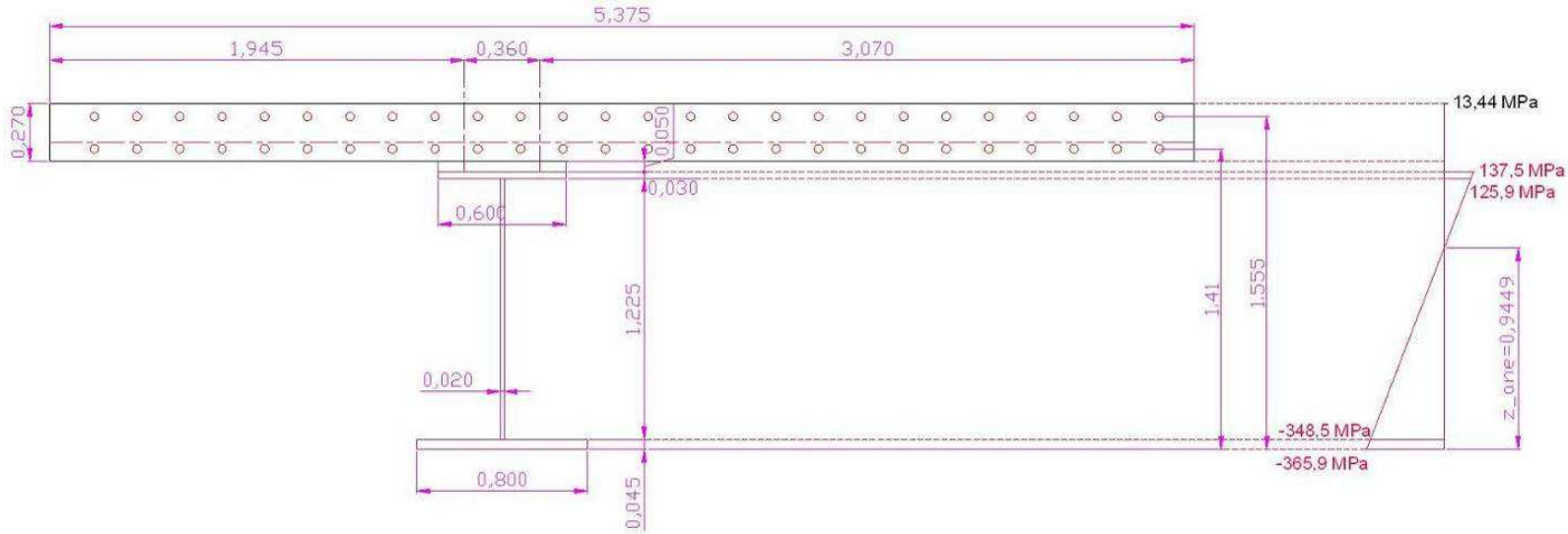
- Les figures ci-après schématisent de façon très générale le diagramme plastique pris en compte pour une poutre en I sous moment positif $MEd \geq 0$ (resp. sous $MEd < 0$) EN1994-2, 6.2.1.2(1)

- Pour un acier à haute limite d'élasticité (S420 ou S460), le béton peut se trouver fissuré par excès de compression :
 - La diminution consécutive de résistance de la section est prise en compte par un facteur réducteur β appliqué directement sur $M_{pl,Rd}^+$, et fonction de la position de l'ANP

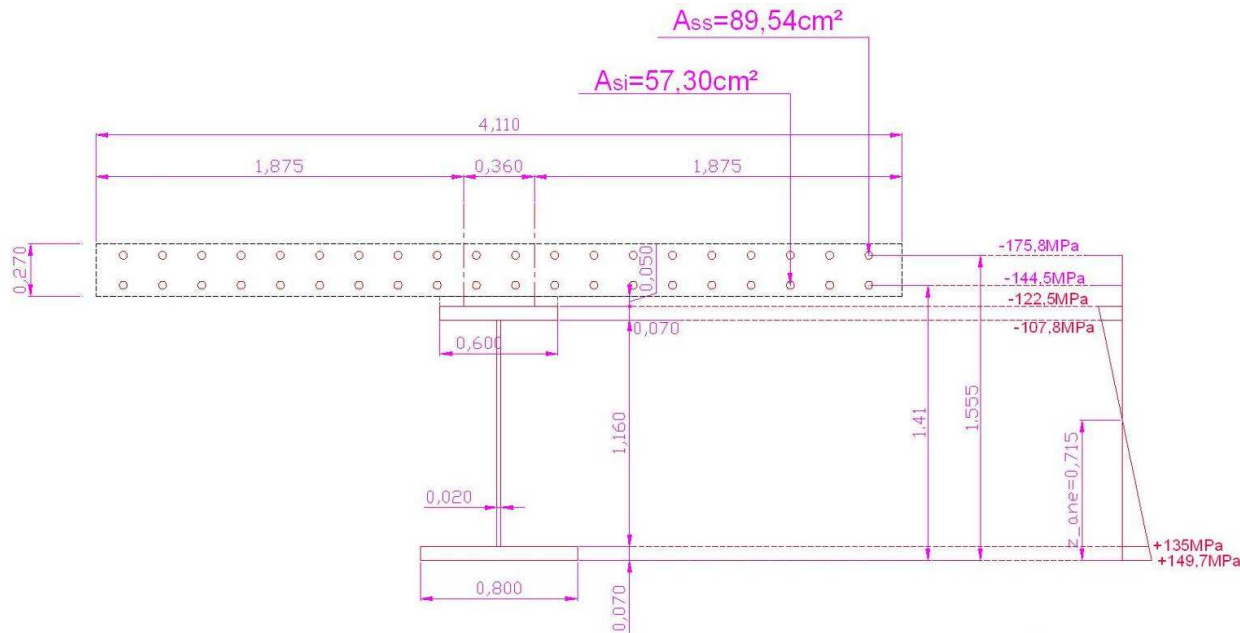
■ Exemple de Détermination de la Classe d'une section à l'ELU (EN

1994-2 5.5.1(1))

□ Résistance en Flexion Positive

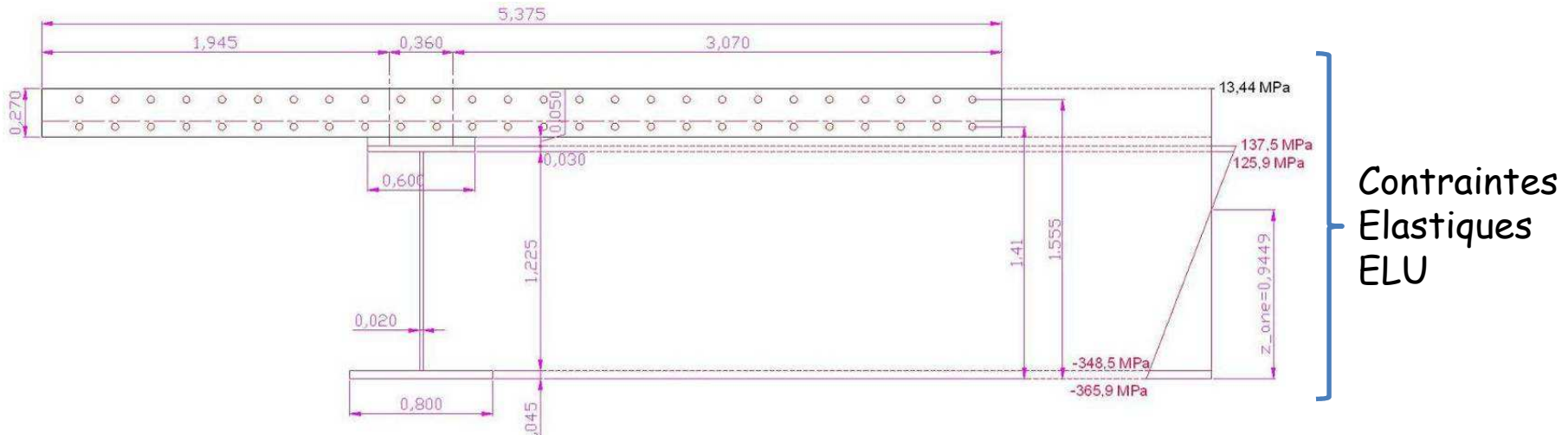


□ Résistance en Flexion négative



■ Exemple de détermination de la Classe d'une section à l'ELU

□ Résistance en Flexion Positive



Contraintes
Elastiques
ELU

$$F_c = \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \cdot A_c = \frac{0,85 \cdot 35}{1,5} \cdot (5,375 \cdot 0,27) = 28,78 \text{ MN}$$

$$F_r = \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \cdot A_r = \frac{0,85 \cdot 35}{1,5} \cdot \left(\frac{0,05}{2} \cdot (0,60 + 0,70) \right) = 0,644 \text{ MN}$$

$$F_s = \frac{f_{ya}}{\gamma_a} \cdot A_s = \frac{345}{1,00} \cdot (0,60 \cdot 0,03) = 6,21 \text{ MN}$$

$$F_w = \frac{f_{ya}}{\gamma_a} \cdot A_w = \frac{345}{1,00} \cdot (1,225 \cdot 0,020) = 8,45 \text{ MN}$$

$$F_i = \frac{f_{ya}}{\gamma_a} \cdot A_i = \frac{335}{1,00} \cdot (0,80 \cdot 0,045) = 12,06 \text{ MN}$$

$$F_c = 28,78 \text{ MN} > F_r + F_s + F_w + F_i = 27,364 \text{ MN}$$

► L'ANP est dans la dalle

— Semelle inférieure tendue → Classe 1

■ Semelle supérieure comprimée donc mixte et connectée au hourdis

► Classe 1

Détermination de la classe de l'âme

■ Ame est donc de C1

■ Sem-inf → C1

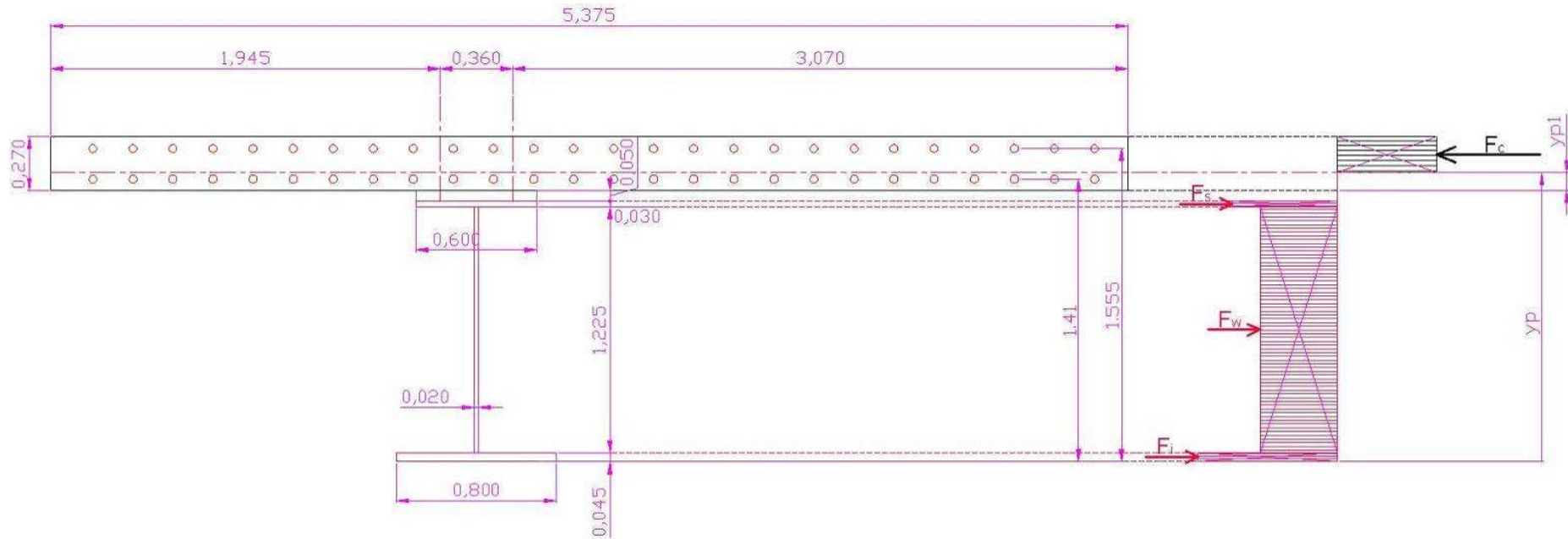
■ Sem-sup → C1

➤ Section de C1

➤ Le calcul peut être mené en plasticité

■ Exemple de détermination de la Classe d'une section à l'ELU

□ Résistance en Flexion Positive



$$\sum F = 0 \Leftrightarrow \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} * b_{eff} * (h_f - y_{p1}) = F_s + F_w + F_i$$

$$y_{p1} = \frac{F_c - (F_s + F_w + F_i)}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_{eff}} = \frac{28,78 - 26,72}{0,85 * 23,34 * 5,375} = 0,0193$$

$$y_p = h_i + h_r + y_{p1} = 1,30 + 0,05 + 0,0193 = 1,369m$$

■ Exemple de détermination de la Classe d'une section à l'ELU

□ Calcul d'un moment plastique positif $M_{pl,Rd}^+$

▶ Semelle supérieure mixte et connectée : **Classe 1**

▶ Semelle inférieure tendue : **Classe 1**

▶ Âme entièrement tendue : **Classe 1**

➡ La section mixte est de classe 1 et peut développer son moment résistant plastique avec entière capacité de rotation sans phénomène de voilement local

➡ Elle peut donc être justifiée en analyse plastique

3.2.4. Calcul du moment résistant plastique

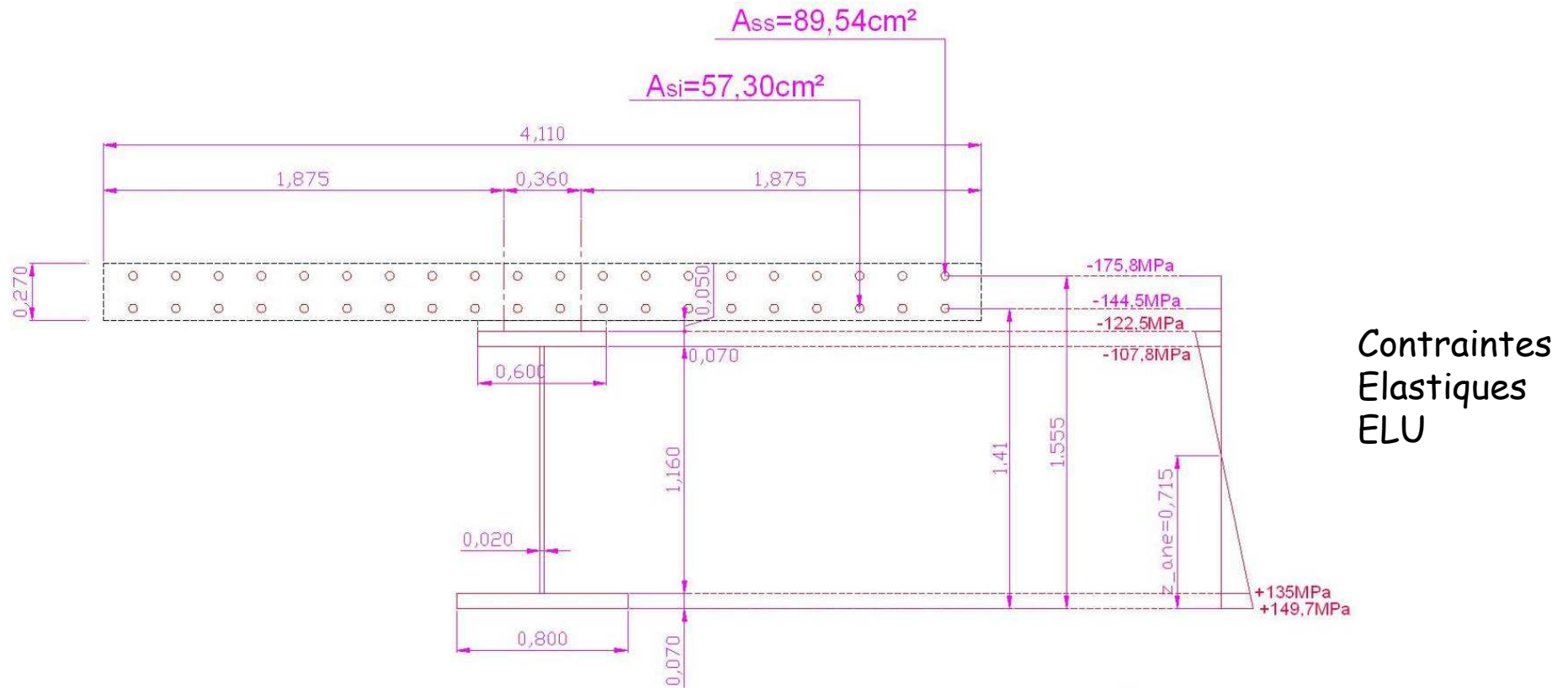
$$\sum M_{Pl, Rd} = 0 \Leftrightarrow$$

$$F_c \cdot \left(\frac{h_c - y_{pl}}{2} \right) + F_s \cdot \left(y_{pl} + h_r + \frac{t_s}{2} \right) + F_w \cdot \left(y_p - t_i - \frac{d}{2} \right) + F_i \cdot \left(y_p - \frac{t_i}{2} \right) =$$
$$28,78 \cdot \left(\frac{0,27 - 0,0193}{2} + 0,0193 \right) + 6,21 \cdot \left(0,0193 + 0,05 + \frac{0,03}{2} \right)$$
$$+ 8,45 \cdot \left(1,369 - 0,045 - \frac{1,225}{2} \right) + 12,06 \cdot \left(1,369 - \frac{0,045}{2} \right) = 26,937 \text{ MN.m}$$

$$\Rightarrow M_{Pl, Rd} = 26,94 \text{ MN.m}$$

■ Exemple de détermination de la Classe d'une section à l'ELU

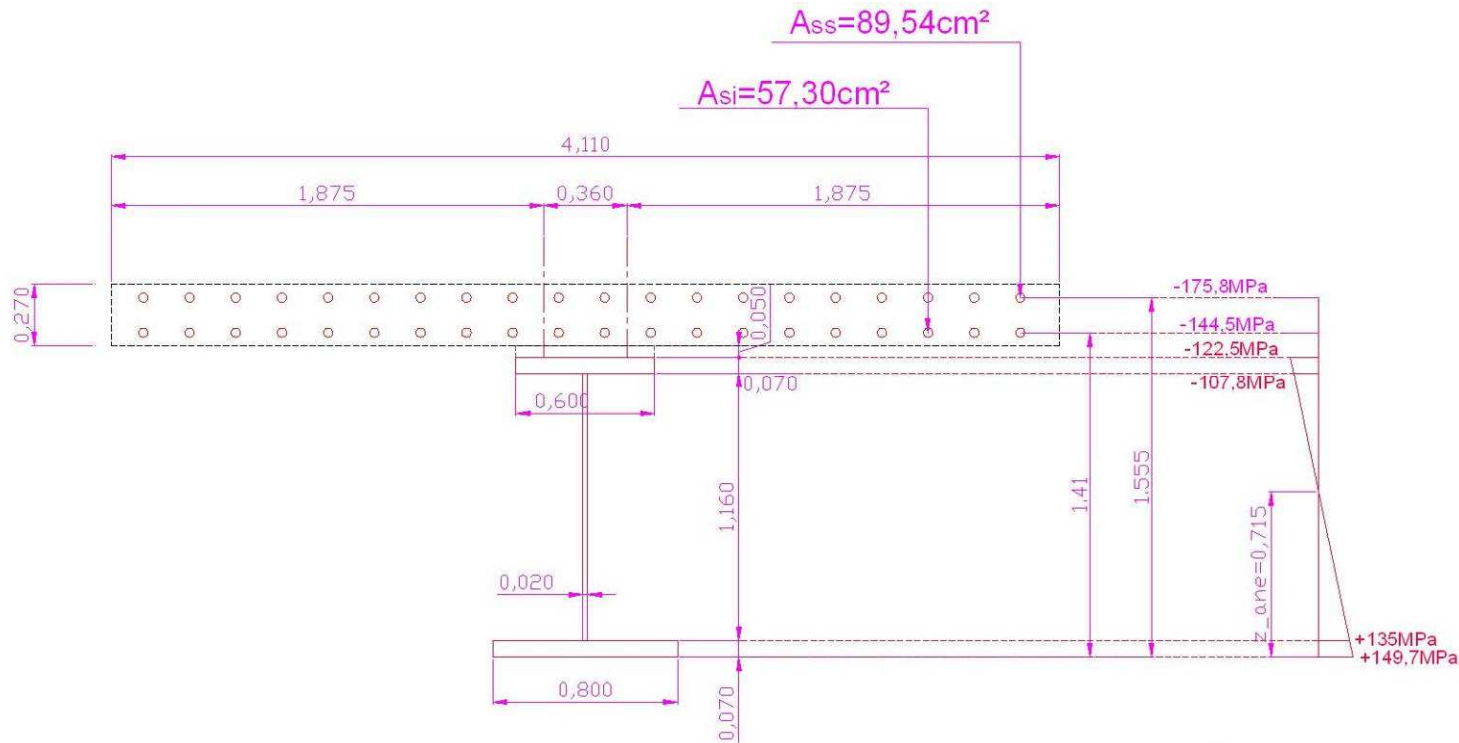
□ Résistance en Flexion Négative sur pile



- Le béton est tendu sur toute la hauteur du hourdis
→ Sa participation est donc négligée dans la résistance plastique de la section mixte pour l'évaluation de sa classe

■ Exemple de détermination de la Classe d'une section à l'ELU

□ Résistance en Flexion Négative sur pile



- Semelle supérieure tendue : **C1**
- Semelle inférieure comprimée :

$$\frac{(b_i - t_w)}{2 * t_i} = \frac{0,80 - 0,02}{2 * 0,07} = 5,571 < 9\varepsilon = 9 * \sqrt{\frac{235}{325}} = 7,653$$

► La semelle inférieure est de **C1**

t (mm)	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	>100 ≤150
f _v	355	345	335	325	315	295
f _u	470	470	470	470	470	450

■ Exemple de détermination de la Classe d'une section à l'ELU

□ Résistance en Flexion Négative sur pile

■ Position de l'Axe Neutre Plastique y_P : Béton entièrement fissuré

$$\bullet F_{as} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \cdot A_{ss} = \frac{500}{1,15} * 89,54 \cdot 10^{-4} = 3,89 \text{MN (Armatures Supérieures)}$$

$$\bullet F_{ai} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \cdot A_{si} = \frac{500}{1,15} * 57,30 \cdot 10^{-4} = 2,49 \text{MN (Armatures Inférieures)}$$

$$\bullet F_s = \frac{f_{ya}}{\gamma_a} \cdot A_s = \frac{325}{1,00} * (0,60 * 0,07) = 13,65 \text{MN (Semelle Supérieure)}$$

$$\bullet F_w = \frac{f_{ya}}{\gamma_a} \cdot A_w = \frac{345}{1,00} * (1,16 * 0,020) = 8,00 \text{MN (Âme)}$$

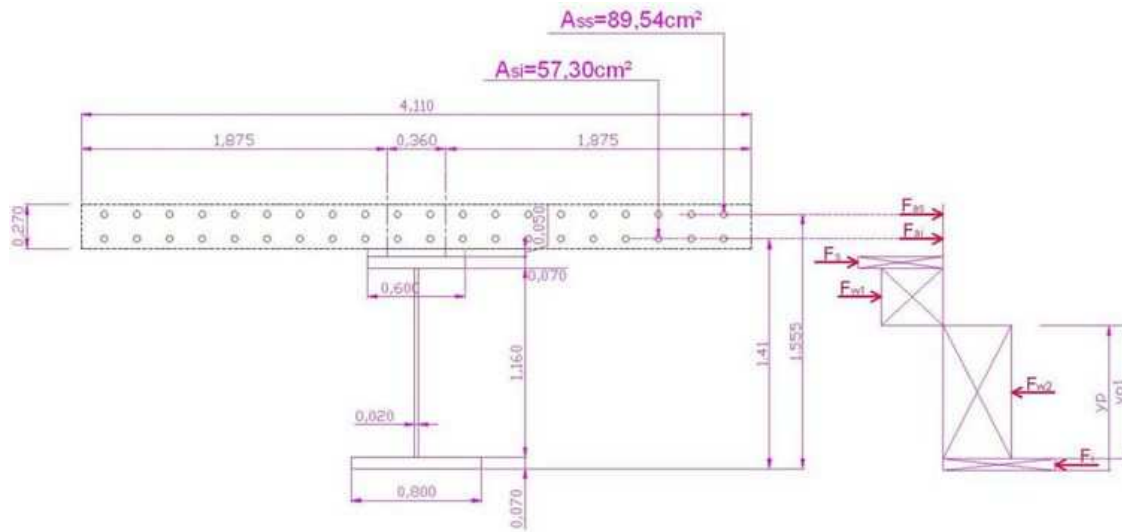
$$\bullet F_i = \frac{f_{ya}}{\gamma_a} \cdot A_i = \frac{325}{1,00} * (0,80 * 0,07) = 18,2 \text{MN (Semelle Inférieure)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{as} + F_{ai} + F_s + F_w = 28,03 \text{ MN} > F_i = 18,2 \text{ MN} \\ \text{et } F_{as} + F_{ai} + F_s = 20,03 \text{ MN} < F_w + F_i = 26,20 \text{ MN} \end{array} \right.$$

► L'ANP est l'âme

■ Exemple de détermination de la Classe d'une section à l'ELU

□ Résistance en Flexion Négative sur pile



$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{0} \Leftrightarrow \mathbf{F}_{as} + \mathbf{F}_{ai} + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_{w1} = \mathbf{F}_{w2} + \mathbf{F}_i$$

$$\mathbf{F}_{as} + \mathbf{F}_{ai} + \mathbf{F}_s + \frac{f_{ya}}{\gamma_a} \cdot (d - y_{p1}) \cdot t_w = \frac{f_{ya}}{\gamma_a} \cdot y_{p1} \cdot t_w + \mathbf{F}_i$$

$$y_{p1} = \frac{\mathbf{F}_{as} + \mathbf{F}_{ai} + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_w - \mathbf{F}_i}{2 \cdot f_{yd} \cdot t_w} = \frac{28,03 - 18,2}{2 * 345 * 0,02} = 0,71\text{m}$$

$$y_p = t_i + y_{p1} = 0,07 + 0,71 = 0,78\text{m}$$

■ Elancement de l'âme : ([Doc.Cours/Ch4-Dim-Poutre-Mixte.doc#Classement_âme](#))

Paroi en flexion composée Fléchie et comprimée :

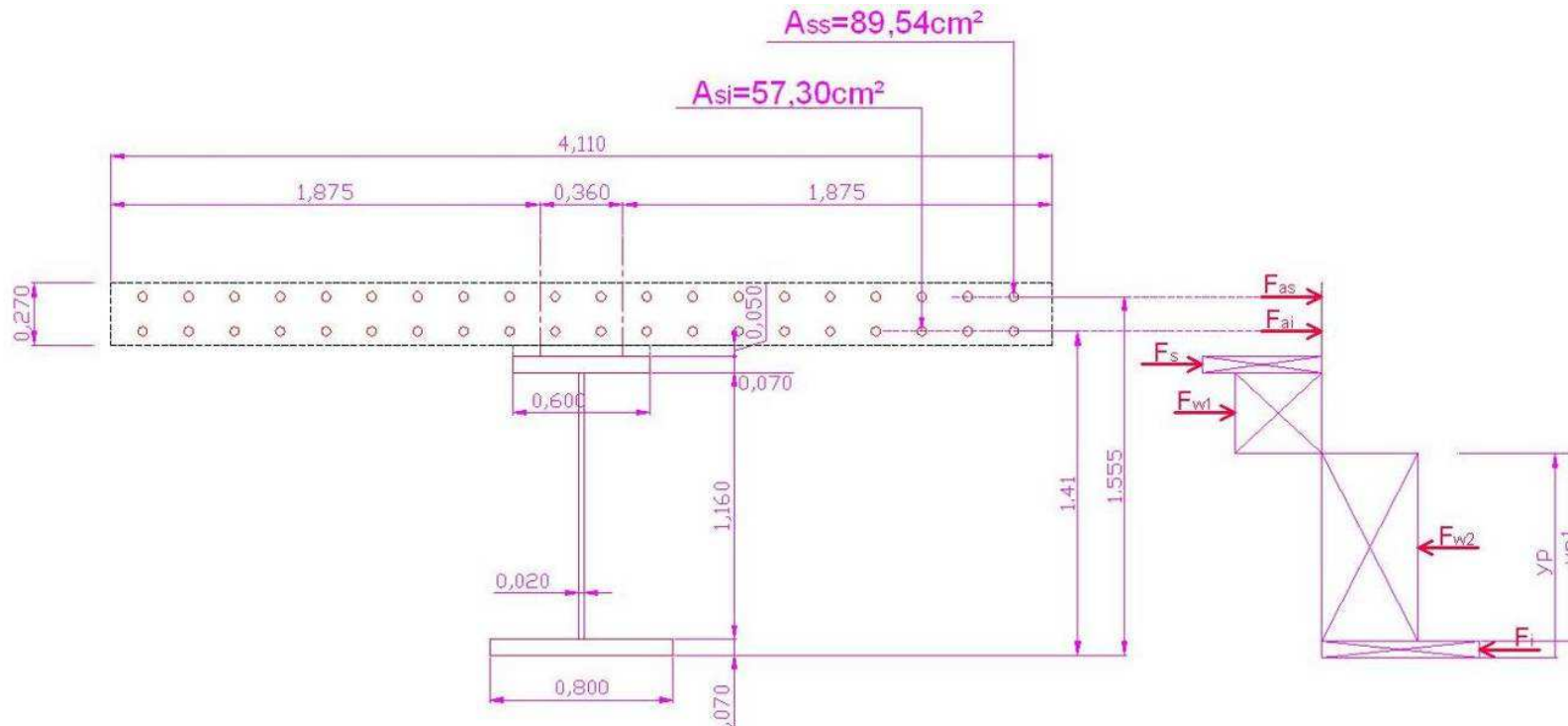
d_c = hauteur comprimée de l'âme :

$$\blacktriangleright \alpha = \frac{d_c}{d} = \frac{y_p - t_i}{d} = \frac{0,78 - 0,07}{1,16} = 0,612 > 0,5 \text{ (L'âme est}$$

comprimée sur plus de la moitié de sa hauteur)

■ Exemple de détermination de la Classe d'une section à l'ELU

□ Résistance en Flexion Négative sur pile



● Elancement limite de classe 1 :

$$\rightarrow \frac{c}{t} = \frac{d}{t_w} = \frac{1,16}{0,02} = 58 > \frac{396 \cdot \epsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = \frac{396 \cdot 0,825}{13 \cdot 0,612 - 1} = 46,97$$

L'âme n'est pas de classe 1

● Elancement limite de classe 2 :

$$\rightarrow \frac{c}{t} = \frac{d}{t_w} = \frac{1,16}{0,02} = 58 > \frac{456 \cdot \epsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = \frac{456 \cdot 0,825}{13 \cdot 0,612 - 1} = 54,08$$

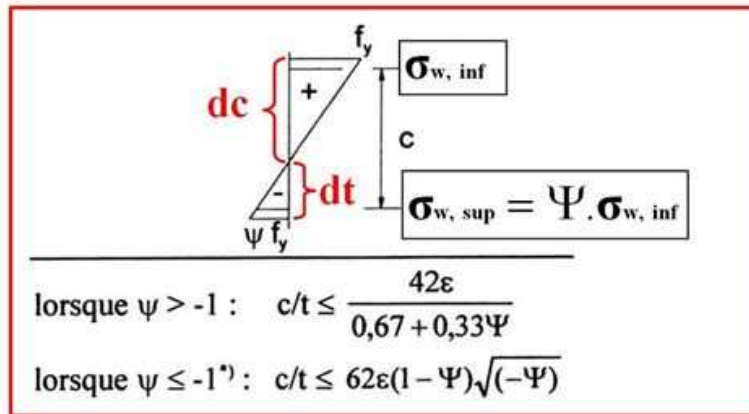
L'âme n'est pas de classe 2 et donc au moins de classe 3

■ Exemple de détermination de la Classe d'une section à l'ELU

On travaille avec les contraintes élastiques ELU concomitantes sur les fibres extrêmes de l'âme du PRS : $\sigma_{w, sup}$; $\sigma_{w, inf}$

De plus, on peut écrire avec les contraintes élastiques ELU sur les fibres extrêmes du PRS : $\sigma_{s, inf}$; $\sigma_{s, sup}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma_{s, sup} + \sigma_{s, inf}}{h_t} = \frac{\sigma_{s, inf}}{d_c} \Rightarrow d_c = \frac{h_t * |\sigma_{s, inf}|}{|\sigma_{s, sup}| + |\sigma_{s, inf}|} \text{ et } d_t = h_t - d_c \\ \Psi = \frac{\sigma_{w, sup}}{\sigma_{w, inf}} = -\frac{d_t - t_s}{d_c - t_i} \end{array} \right.$$



Rem : Sens algébrique des inéquations :

$$\Psi = \frac{\sigma_{w, sup} (< 0 : \text{Traction})}{\sigma_{w, inf} (> 0 : \text{compression})}$$

$\Psi > -1 \rightarrow \Psi = -0,96$ par ex. :

➡ |Traction sur fibre sup.| < |Compression sur fibre inf.|

$\Psi < -1 \rightarrow \Psi = -1,06$ par ex. :

➡ |Traction sur fibre sup.| > |Compression sur fibre inf.|

➡ Si $\psi > -1$: $\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} \leq \frac{42.\varepsilon}{0,67 + 0,33\Psi}$ pour que l'âme soit de

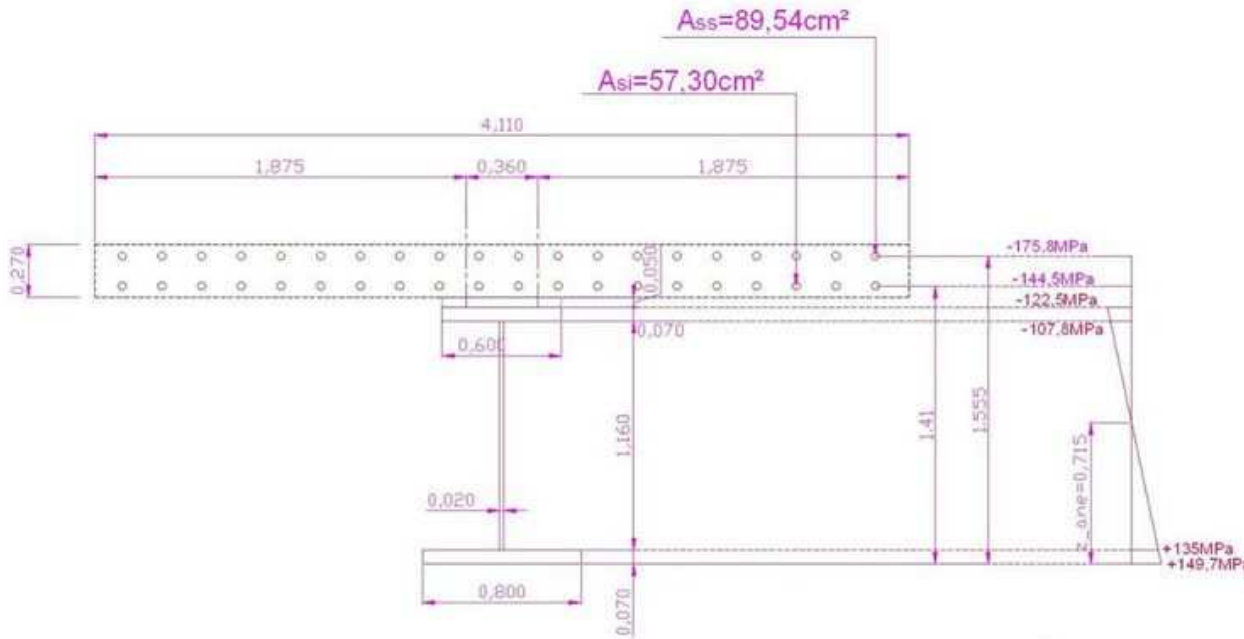
Classe 3 ($\psi > -1 \rightarrow$ |Traction sur fibre sup.| < |Compression sur fibre inf.|)

➡ Si $\psi \leq -1$: $\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} \leq 62.\varepsilon.(1 - \Psi).\sqrt{-\Psi}$ pour que l'âme

soit de Classe 3

($\psi \leq -1 \rightarrow$ |Traction sur fibre sup.| > |Compression sur fibre inf.|)

Exemple de détermination de la Classe d'une section à l'ELU



Justification ELU élastique de la section

$x=30,75\text{m}$ en flexion sous $M_{u,Ed,y,\min}$

On doit alors vérifier à l'ELU :

(Béton totalement fissuré)

$$\bullet \sigma_{s,\text{inf}} \leq \frac{f_{yf,\text{inf}}}{\gamma_{M0}} ; \quad \sigma_{s,\text{sup}} \leq \frac{f_{yf,\text{sup}}}{\gamma_{M0}}$$

$$\bullet \sigma_{ss,\text{inf}} \leq \frac{f_{sk}}{\gamma_s} ; \quad \sigma_{ss,\text{sup}} \leq \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

$$\Psi = \frac{\sigma_{w,\text{sup}}}{\sigma_{w,\text{inf}}} = - \frac{|d_t - t_s|}{|d_c - t_i|} \Leftrightarrow$$

$$\frac{\sigma_{w,\text{sup}}}{\sigma_{w,\text{inf}}} = \frac{-107,8}{135} = -0,798 = - \frac{|(1,30 - 0,715) - 0,07|}{|0,715 - 0,07|} = -0,798$$

$$\psi > -1 \rightarrow$$

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{1,16}{0,02} = 58 \leq \frac{42 \cdot \varepsilon}{0,67 + 0,33 \cdot \Psi} = \frac{42 \cdot 0,825}{0,67 + 0,33 \cdot -0,798} = 85,206$$

L'âme est donc de classe 3

Conclusion : La section sur appui P1 à $x = 30,75\text{m}$ est donc de classe 3 et devra être justifiée en analyse élastique à l'ELU.



□ Résistance à l'Effort Tranchant

□ En pratique, on considère que $V_{u,Ed}$ n'est repris que par l'aire de cisaillement A_v du PRS (comme si la section n'était pas mixte) même si l'expérience montre qu'une partie du cisaillement vertical est reprise par la dalle

➤ Il n'existe pas de modèle simple exprimant analytiquement cette contribution de la dalle

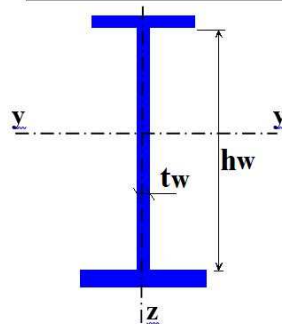
□ 1 : Effort Tranchant Résistant Plastique :

$$V_{pl,a,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

$$\gamma_{M0} = 1,00$$

avec :

Profils Reconstitué Soudés en I ou en H ou en Caissons



$$\bullet A_{v,Z} = \sum (h_w \cdot t_w)$$

$$\bullet A_{v,Y} = A - \sum (h_w \cdot t_w)$$

□ Dans la réalité, la résistance plastique $V_{pl,a,Rd}$ ci-dessus n'est valable que si l'âme du PRS reste stable au voilement par cisaillement du panneau d'âme adjacent à la section vérifiée

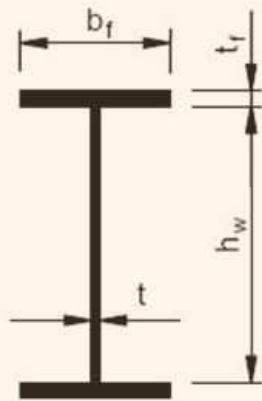
Résistance à l'Effort Tranchant

Prise en compte du voilement par cisaillement dans la résistance plastique à l'effort tranchant selon l'**EN 1993 1-5§5**

Il faut vérifier le panneau au voilement par cisaillement pour les plaques dont le rapport (élancement) $\frac{h_w}{t_w}$: **EN 1993 1-5§5.1(2)**

▶ $> \frac{72 \cdot \varepsilon}{\eta}$ pour une âme non raidie

▶ $> \frac{31 \cdot \varepsilon}{\eta} \cdot \sqrt{k_{\tau}}$ pour une âme raidie transversalement et/ou longitudinalement vis-à-vis du voilement par cisaillement



● L'Annexe Nationale définit η :

➔ $\eta = 1,20$ pour les nuances d'acier jusqu'à S460 compris

➔ $\eta = 1,00$ est recommandée pour les nuances d'acier plus élevées

➔ $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$; k_{τ} : Coef. de voilement par cisaillement

Résistance à l'Effort Tranchant

Prise en compte du voilement par cisaillement dans la résistance plastique à l'effort tranchant selon l'**EN 1993 1-5§5**

□ 2 : Résistance plastique de la section au voilement par cisaillement ($\gamma_{M1}=1,10$) :

$$V_{b, Rd} = V_{bw, Rd} + V_{bf, Rd} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

Avec :

$$V_{bw, Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

$V_{bw, Rd}$: Contribution de l'âme au voilement par cisaillement

χ_w : Coefficient de contribution de l'âme au voilement par cisaillement

$$V_{bf, Rd} = \frac{b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}}{c \cdot \gamma_{M1}} \cdot \left(1 - \left(\frac{M_{u, Ed}}{M_{f, Rd}} \right)^2 \right)$$

$V_{bf, Rd}$: Contribution des semelles au voilement par cisaillement (lorsque la résistance des semelles n'est pas entièrement utilisée dans la résistance en flexion ($M_{u, Ed} < M_{f, Rd}$))

□ Résistance à l'Effort Tranchant

χ_w : Calcul du Coefficient de contribution de l'âme du PRS au voilement par cisaillement selon l' **EN 1993 1-5§5**

k_τ : Coefficient de voilement par cisaillement (**Annexe A3 EN1993 1-1 §1.5**)

$$k_\tau = 5,34 + 4 \cdot \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + k_{\tau sl} \text{ si } \frac{a}{h_w} \geq 1$$

$$k_\tau = 4 + 5,34 \cdot \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + k_{\tau sl} \text{ si } \frac{a}{h_w} < 1$$

a : Espacement longitudinal des raidisseurs d'âme

h_w : Hauteur de l'âme du PRS

Dépend uniquement du raidissage longitudinal

Voir EC3 1-5 Annexe A3

χ_w : Pour les âmes comportant des raidisseurs transversaux au droit des appuis uniquement et pour les âmes comportant des raidisseurs intermédiaires, transversaux, longitudinaux, ou les deux, déterminer le coefficient χ_w pour la contribution de l'âme à la résistance au voilement par cisaillement à partir du **Tableau 5.1 ou de la Figure 5.2**.

Tableau 5.1 — Contribution de l'âme χ_w à la résistance au voilement par cisaillement

	Montant d'extrémité rigide	Montant d'extrémité non rigide
$\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$	η	η
$0,83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83/\bar{\lambda}_w$	$0,83/\bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37/(0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83/\bar{\lambda}_w$

□ Résistance à l'Effort Tranchant

χ_w : Calcul du Coefficient de contribution de l'âme du PRS au voilement par cisaillement selon l' **EN 1993 1-5§5**

- $\bar{\lambda}_w = 0,76 \cdot \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}}$ Avec

$\bar{\lambda}_w$: Paramètre d'élançement de l'âme (*EC3 1-5 §5.3(1) Tableau 5.1*)

- $\tau_{cr} = k_{\tau} \cdot \sigma_E$ avec τ_{cr} : Contrainte critique de voilement par cisaillement (*EC3 1-5 §5.3(3) et Annexe A1*)

- $\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t_w^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot h_w^2}$ (*EC3- 1-5.A1*)

D'où : $V_{b, Rd} = V_{bw, Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$

□ 3 : Résistance plastique finale de la section à l'effort Tranchant :

$$V_{pl, Rd} = \text{Min} \left[V_{pl, a, Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} ; V_{b, Rd} = V_{bw, Rd} + V_{bf, Rd} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \right]$$

□ Résistance à l'Effort Tranchant - Interaction $M_{u,Ed} - V_{u,Ed}$

Lorsqu'agissent simultanément $M_{u,Ed}$ et $V_{u,Ed}$ **concomittants** dans une section transversale, l'expérience montre que la réduction du moment résistant plastique $M_{pl,Rd}$ n'est pas sensible tant que :

▶ $V_{u,Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$

◆ Sinon : **L'interaction de $V_{u,Ed}$ sur $M_{pl,Rd}$ doit être justifiée**

□ Critères d'interaction $M_{u,Ed} - V_{u,Ed}$

Sections de Classe C1 et C2 : (EC4-2 §6.2.2.4)

$$M_{Rd} = M_{f, Rd} + (M_{Pl, Rd} - M_{f, Rd}) \left[1 - \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1 \right)^2 \right]$$

Sections de Classe C3 et C4 : (EN 1993 1-5 §7)

Si $\bar{\eta}^3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw, Rd}} > 0,5$, il convient que les effets combinés de la flexion et du cisaillement sur l'âme d'une poutre en I ou d'une poutre caisson satisfassent :

$$\bar{\eta}_1 + \left[1 - \frac{M_{f, Rd}}{M_{Pl, Rd}} \right] (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1 \text{ pour } \bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{Pl, Rd}} \geq \frac{M_{f, Rd}}{M_{Pl, Rd}} \text{ sinon } \bar{\eta}_1 = \frac{M_{f, Rd}}{M_{Pl, Rd}}$$

□ Résistance à l'Effort Tranchant - Interaction $M_{u,Ed} - V_{u,Ed}$

- $M_{f,Rd}$: Moment résistant plastique de calcul d'une section composée uniquement des semelles efficaces
- $M_{pl,Rd}$: Résistance plastique de la section composée de l'aire efficace des semelles et de la totalité de l'âme quelle que soit la classe de celle-ci (Section brute initiale)
 - Il convient de vérifier le critère pour toute section située à plus de $h_w/2$ de l'appui le plus proche pourvu d'un montant

Représentation d'une section de C3 avec non prise en compte de l'âme, pour le calcul de $M_{f,Rd}$:

