



Research Fund for Coal and Steel

COMBRI⁺

COMBRI⁺

Valorisation de l'état de l'art pour améliorer la compétitivité des ponts mixtes et en acier



Universität Stuttgart
Germany

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

ctim

L
LULEÅ
UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Université
de Liège 

labein
tecnalia

Sétra service d'Études
techniques
des routes
et autoroutes



Exemple de dimensionnement n°2: Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI⁺

■ Sommaire

- 1. Description du pont caisson mixte en acier-béton
- 2. Analyse globale du pont caisson mixte en acier-béton
- 3. Vérifications des sections transversales
 - 1. Travée P1-P2 (moment positif)
 - 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif)
- 4. Vérification des sections transversales durant le lançage
 - 1. Vérification du panneau d'âme selon **la section 6 et 7 de EN1993-1-5**
 - 2. Vérification du panneau d'âme selon **la section 10 de EN1993-1-5**



Exemple de dimensionnement n°2:

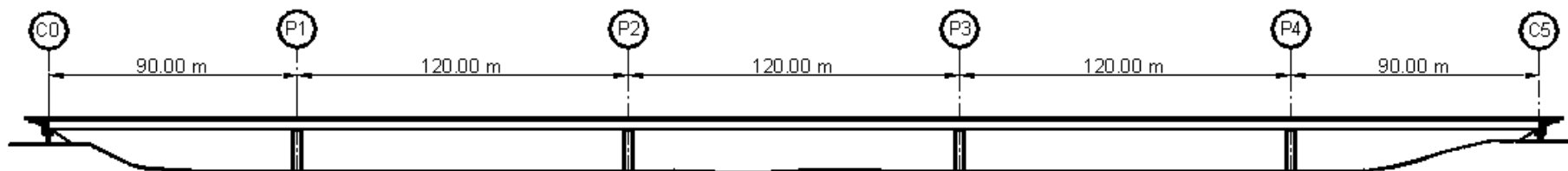
Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 1. Description du pont caisson mixte en acier-béton

□ Vue en élévation

- Pont symétrique de 540 m de long
- 5 travées de 90 m, 120 m, 120 m, 120 m et 90 m
- Le caisson acier à une hauteur constante de 4 m
- Pont parfaitement droit en plan et en élévation





Exemple de dimensionnement n°2:

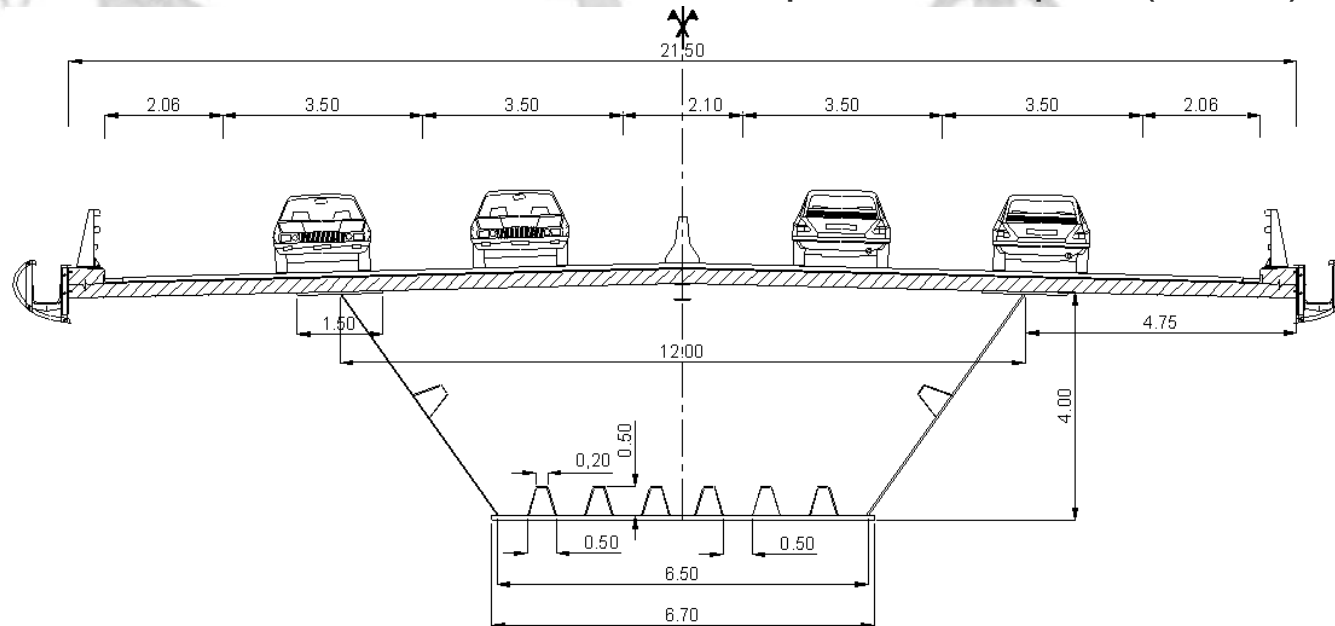
Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 1. Description du pont caisson mixte en acier-béton

□ Vue de la section transversale

- Pont de 21.5 m de largeur
- 4 bandes de circulation de 3.5 m, 2 bandes d'arrêt d'urgence de 2.06 m de chaque côté et une bande centrale de 2.10 m
- 1 barrière de sécurité standard de chaque coté du pont (64 cm)





Exemple de dimensionnement n°2:

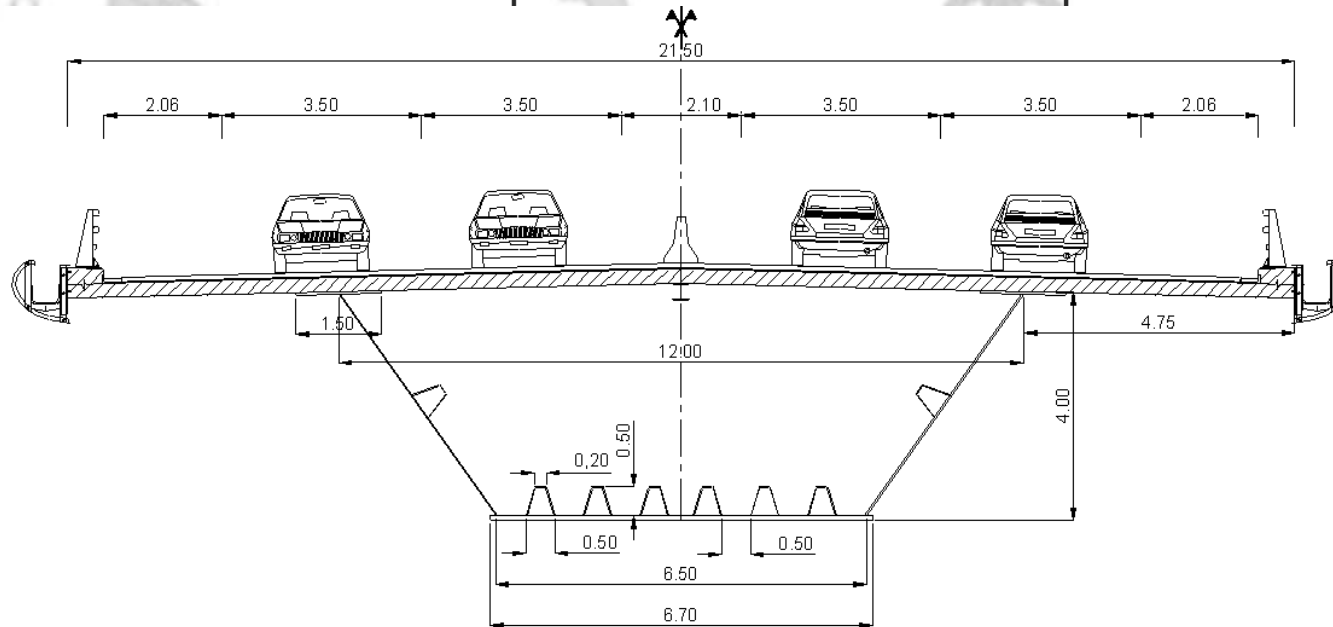
Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 1. Description du pont caisson mixte en acier-béton

□ Vue de la section transversale

- La distance entre la partie supérieure des 2 âmes vaut 12 m et la distance entre la partie inférieure des 2 âmes vaut 6.5 m
- La partie cantilever de la dalle vaut, de chaque côté du pont, 4.75 m
- La dalle de béton à une épaisseur constante théorique de 32.5 cm





Exemple de dimensionnement n°2:

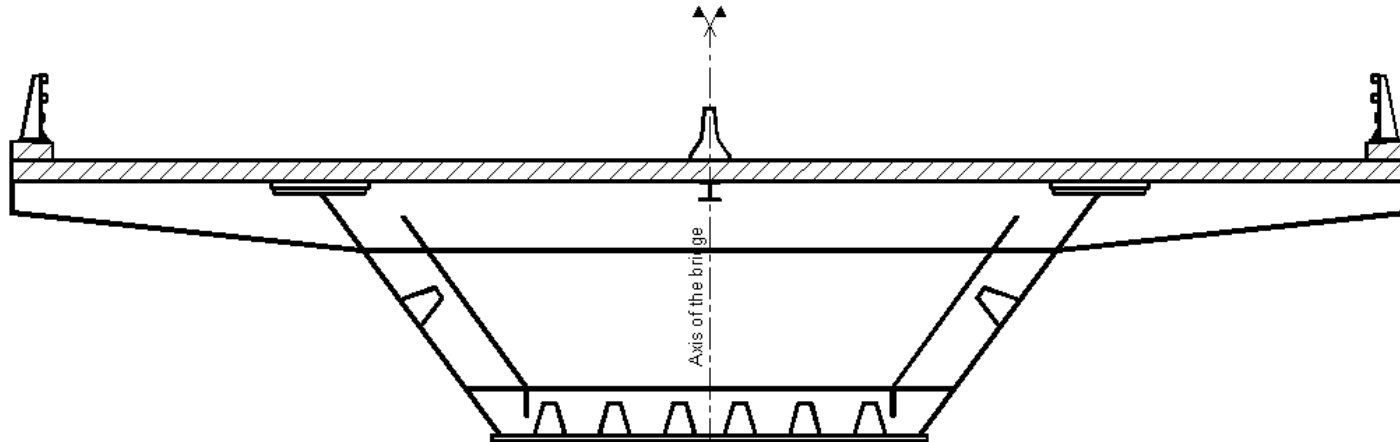
Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 1. Description du pont caisson mixte en acier-béton

□ Vue d'un contreventement transversale sur appui

- Le caisson est contreventé transversalement sur appui et tous les 4 mètres
- Pour justifier la résistance à l'effort tranchant sur les appuis intermédiaires, les contreventements transversaux sont ajoutés à 2.5 m de l'appui
- Une poutre additionnelle en I est connectée à la dalle en béton sur l'axe de symétrie pour faciliter les phases de bétonnage
- Des semelles supérieures additionnelles de 1.40 m de large et de 90 mm d'épaisseur sont ajoutées sur appui





Exemple de dimensionnement n°2:

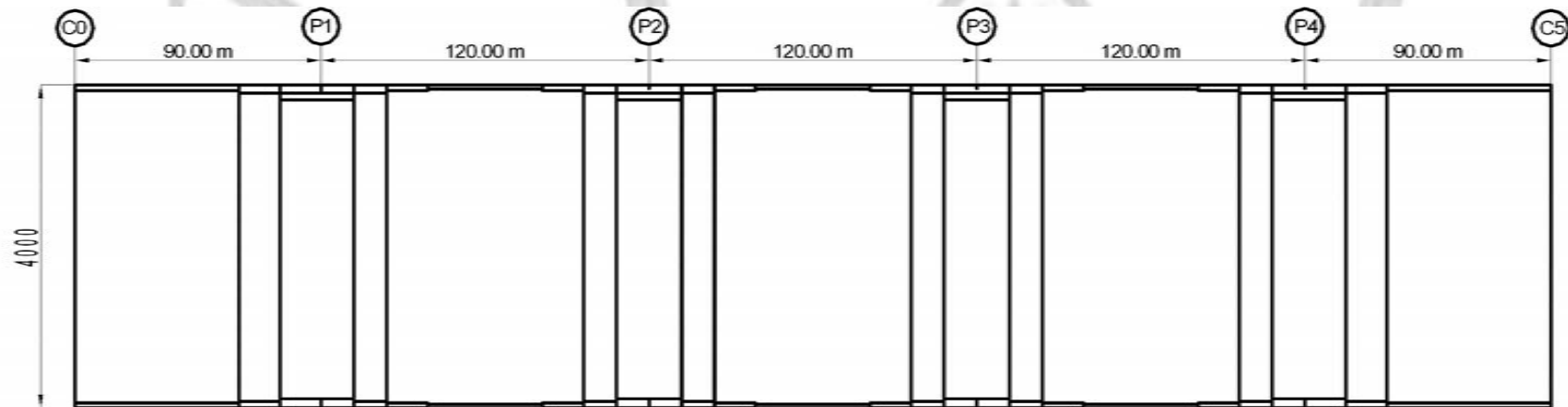
Pont caisson mixte en acier-béton



1. Description du pont caisson mixte en acier-béton

□ Répartition de l'acier dans les poutres maitresses

- Ames d'épaisseur variables (18 mm à 27 mm)
- Semelle inférieure d'épaisseur variable (35 mm à 75 mm)
- Semelles supérieures de 1.50 m de largeur et d'épaisseur variable (50 mm à 100 mm) + Ajout de semelles additionnelles sur appui

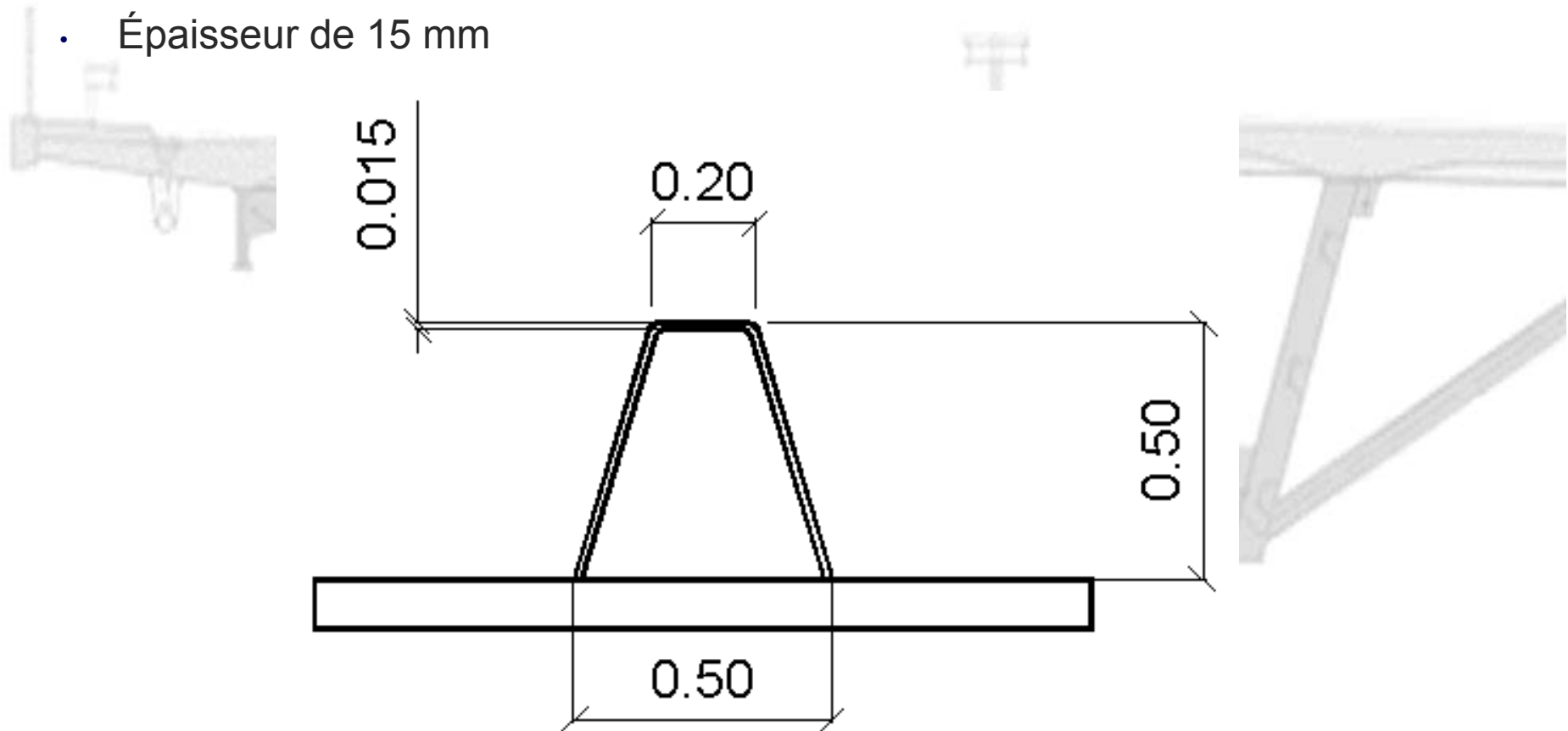


UPPER FLANGE Constant width 1500 mm	60000 x 70	15000 x 100	15000+12000 x (100+90)	12000 x 100	15000 x 70	42000 x 50	15000 x 70	12000 x 100	24000 x (100+90)	12000 x 100	15000 x 70	42000 x 50	15000 x 70	12000 x 100	24000 x (100+90)	12000 x 100	15000 x 70	42000 x 50	15000 x 70	12000+15000 x (100+90)	15000 x 100	60000 x 70
WEB	20 x 60000	24 x 15000	27 x 15000	27 x 12000	24 x 12000	18 x 42000	18 x 15000	24 x 12000	27 x 24000	24 x 12000	18 x 15000	18 x 42000	18 x 15000	24 x 12000	27 x 24000	24 x 12000	18 x 15000	18 x 42000	18 x 15000	27 x 24000	27 x 15000	24 x 15000
LOWER FLANGE Constant width 3350 mm	60000 x 35	15000 x 50	15000 x 75	12000 x 75	12000 x 50	42000 x 25	15000 x 35	12000 x 50	24000 x 75	12000 x 50	15000 x 35	42000 x 25	15000 x 35	12000 x 50	24000 x 75	12000 x 50	15000 x 35	42000 x 25	15000 x 35	12000 x 50	12000 x 75	15000 x 75



■ 1. Description du pont caisson mixte en acier-béton

- Raidisseurs longitudinaux d'âme et de la semelle inférieur
 - Épaisseur de 15 mm



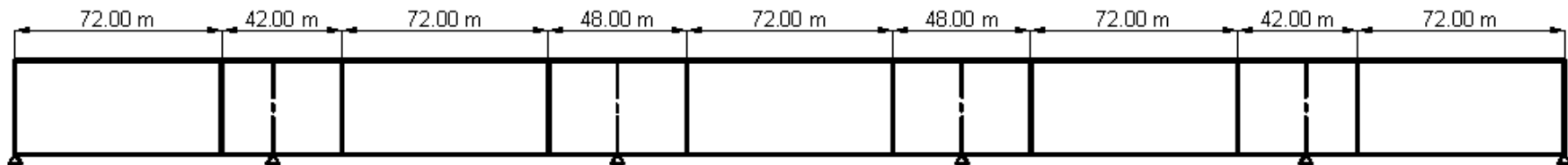


Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

- **1. Description du pont caisson mixte en acier-béton**
 - Description des armatures longitudinales utilisés dans la dalle
 - En travée
 - Nappe supérieure: diamètre ϕ 16 mm espacée de 130 mm
 - Nappe inférieure: diamètre ϕ 16 mm espacée de 130 mm
 - Pour une densité totale d'armature: $\rho_s = 0.96 \%$
 - Sur appui
 - Nappe supérieure: diamètre ϕ 20 mm espacée de 130 mm
 - Nappe inférieure: diamètre ϕ 16 mm espacée de 130 mm
 - Pour une densité totale d'armature: $\rho_s = 1.22 \%$





Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 1. Description du pont caisson mixte en acier-béton

□ Propriétés matérielles

■ Acier structurelle

- Nuance d'acier S355 : $f_y = 355$ MPa, $E_a = 210000$ MPa
- Décroissance de la limite d'élasticité et de la limite de rupture avec l'augmentation d'épaisseur des plaques:

épaisseur de plaque t	≤ 16 mm	>16 mm ≤ 40 mm	>40 mm ≤ 63 mm	>63 mm ≤ 80 mm	>80 mm ≤ 100 mm	>100 mm ≤ 150 mm
f_y	355 MPa	345 MPa	335 MPa	325 MPa	315 MPa	295 MPa
f_u	470 MPa	470 MPa	470 MPa	470 MPa	470 MPa	450 MPa

■ Béton

- Classe C35/45 : $f_{ck} = 35$ MPa, $E_{cm} = 34077$ MPa

■ Acier des armatures

- Nuance d'acier S500 : $f_y = 500$ MPa, $E_s = E_a = 210000$ MPa



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 2. Analyse globale du pont caisson mixte en acier-béton

□ Actions prises en compte dans l'analyse

- Poids propre de l'acier structurel
 - Densité de l'acier structurel: 77 kN/m³
- Poids propre de la dalle de béton armée
 - Densité de la dalle de béton armée: 25 kN/m³
- Poids propre des équipements non structurels du pont

Equipements non structurel	Caracteristiques	Multiplicateur Maximum	Multiplicateur Minimum	q_{nom} (kN/m)	q_{max} (kN/m)	q_{min} (kN/m)
Couche d'étanchéité	3 cm d'épaisseur, 25 kN/m ³	1.2	0.8	4.2	5.04	3.36
Asphalte	8 cm d'épaisseur, 25 kN/m ³	1.4	0.8	11	15.4	8.8
Support en béton pour les barrières de sécurité	aire 0.5 x 0.2 m, 25 kN/m ³	1	1	2.5	2.5	2.5
Barrières de sécurité	65 kg/m	1	1	0.638	0.638	0.638
Corniche	25 kg/m	1	1	0.245	0.245	0.245
Total				18.58	23.82	15.54



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton



■ 2. Analyse globale du pont caisson mixte en acier-béton

□ Actions prises en compte dans l'analyse

■ Retrait

- Prise en compte du retrait ("autogène" and retrait de séchage)

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{ca} + \varepsilon_{cd}$$

	Retrait à l'ouverture du trafic (t _m)	Retrait après un temps infini
Autogenous shrinkage	4.88E-05	6.25E-05
Drying shrinkage	1.36E-05	1.77E-04
Total	6.2E-05	2.4E-04

■ Fluage

- Rapport de module pour chargement à court terme:

$$n_0 = \frac{E_a}{E_{cm}} = \frac{210000}{22000 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3}} = 6.1625$$

- Rapport de module pour chargement à long terme:

$$n_L = n_0 (1 + \psi_L \varphi(\infty, t_0))$$

Cas de chargement	ψ_L	t_0 (jours)	$\varphi(\infty, t_0)$	n_L
Bétonnage	1.1	24	1.484	16.22
Retrait	0.55	1	2.683	15.25
Equipement non structurel du pont	1.1	57.5	1.256	14.68



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

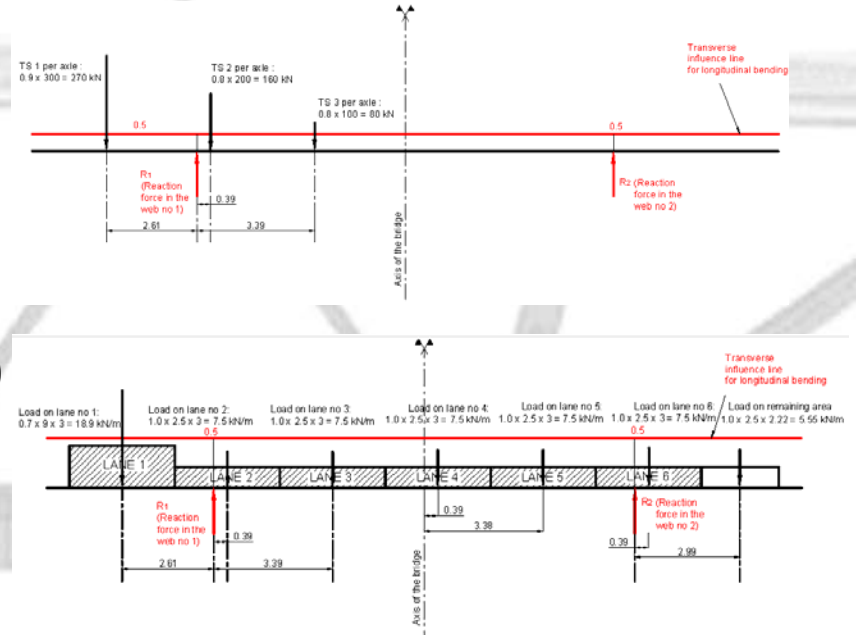
COMBRI+

■ 2. Analyse globale du pont caisson mixte en acier-béton

□ Actions prises en compte dans l'analyse

- Charges de trafic
 - Système de Tandem (TS)

- Charge uniformément répartie (UDL)



- TS et UDL sont placés longitudinalement et transversalement sur le tablier afin d'obtenir les effets les plus défavorables pour les poutres principales



■ 2. Analyse globale du pont caisson mixte en acier-béton

□ Combinaison d'action

■ Combinaison ULS autre que la fatigue:

- $1.35 G_{k,sup}$ (ou $1.0 G_{k,inf}$) + (1.0 ou 0.0) S + 1.35 { UDL_k + TS_k }

- $G_{k,sup}$: valeur caractéristique d'une action permanente défavorable (valeur nominale de poids propre et valeur maximum des équipements non structurel) prise en compte dans les phases de construction

- $G_{k,inf}$: valeur caractéristique d'une action permanente favorable (valeur nominale de poids propre et valeur minimum des équipements non structurel) prise en compte dans les phases de construction

- S : enveloppe des valeurs caractéristiques des forces internes et des moments (ou des déformations) dus au retrait du béton

- UDL_k : enveloppe des valeurs caractéristiques des forces internes et des moments (ou des déformations) dus aux charges verticales uniformément réparties du modèle de chargement n°1 de **l'Eurocode EN1991-2**

- TS_k : enveloppe des valeurs caractéristiques des forces internes et des moments (ou des déformations) dus aux charges verticales concentrées du modèle de chargement n°1 de **l'Eurocode EN1991-2**



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

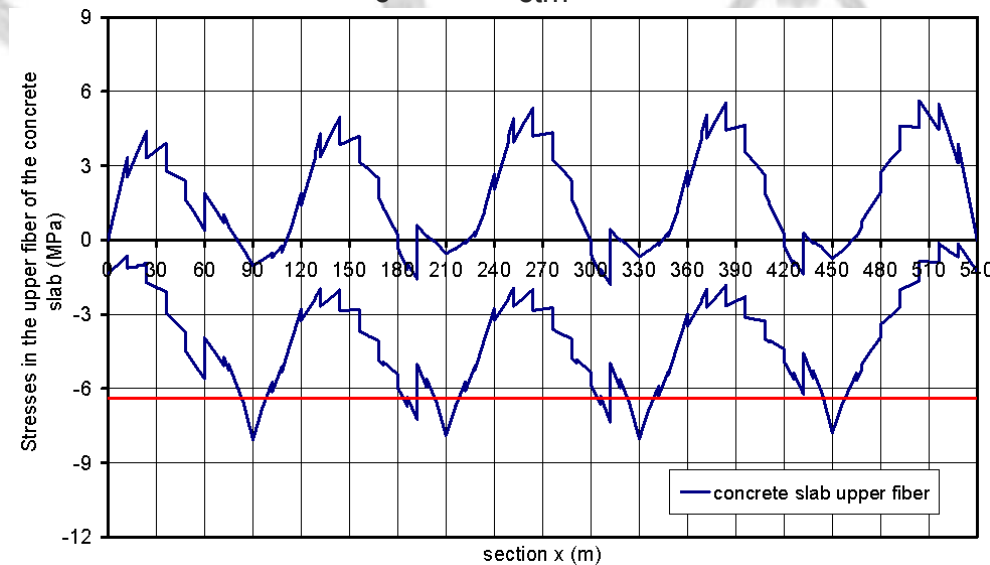
■ 2. Analyse globale du pont caisson mixte en acier-béton

□ Actions prises en compte dans l'analyse

■ Prise en compte de la fissuration du béton:

- 1^{ère} analyse globale (non fissurée)

- Le béton est supposé fissuré lorsque la contrainte longitudinale dans la dalle de béton dépasse $\sigma_c \geq -2 f_{ctm} = -6.4 \text{ MPa}$



- 2^{ème} analyse globale (fissurée)



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 2. Analyse globale du pont caisson mixte en acier-béton

□ Actions prises en compte dans l'analyse

■ Prise en compte du trainage de cisaillement dans la dalle de béton:

$$b_{\text{eff}} = b_0 + \beta_1 b_{e1} + \beta_2 b_{e2}$$

$$L_{e1} = 0.85.L_1 = 0.85.90 \text{ m} = 76.5 \text{ m}$$

$$L_{e2} = 0.7.L_2 = 0.7.120 \text{ m} = 84 \text{ m}$$

$$L_{e3} = 0.25.(L_1 + L_2) = 0.25.(90 + 120) = 52.5 \text{ m}$$

$$L_{e4} = 0.25.(L_1 + L_2) = 0.25.(120 + 120) = 60 \text{ m}$$

$$L_{ei} \geq b_1$$

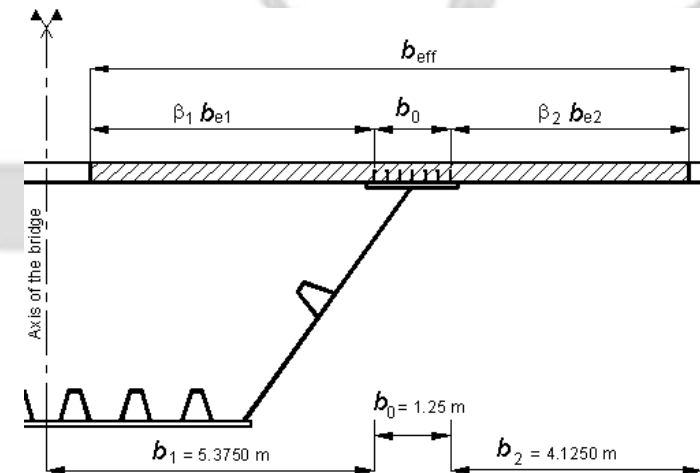
$$b_0 = 1.25 \text{ m}$$

$$b_{e1} = \min (L_e/8 ; b_1) = 5.375 \text{ m}$$

$$b_{e2} = \min (L_e/8 ; b_2) = 4.125 \text{ m}$$

$$\beta_1 = \beta_2 = 1$$

$\Rightarrow b_{\text{eff}} = 10.75 \text{ m} \Rightarrow$ pleine largeur efficace pour toutes les sections





Exemple de dimensionnement n°2:

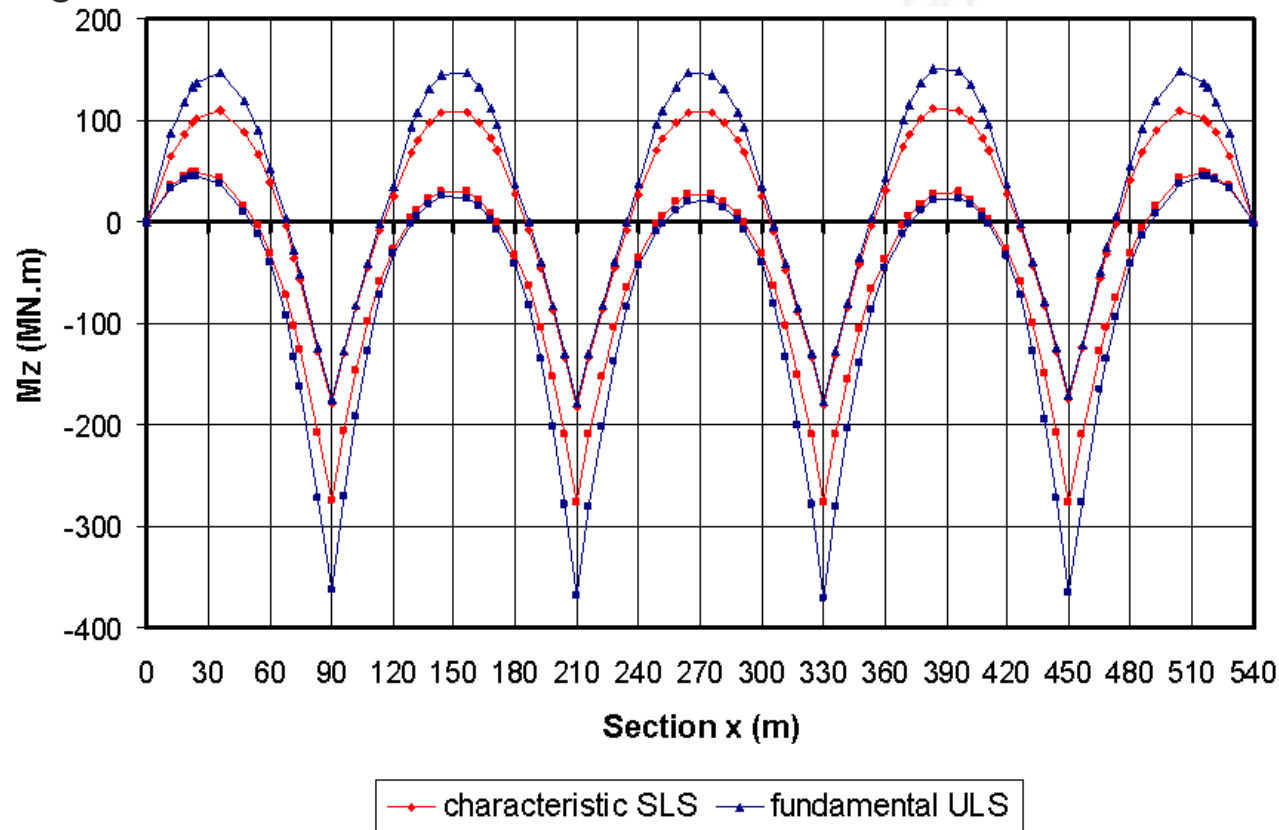
Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 2. Analyse globale du pont caisson mixte en acier-béton

□ Résultats

■ Diagramme des moments de flexion





Exemple de dimensionnement n°2:

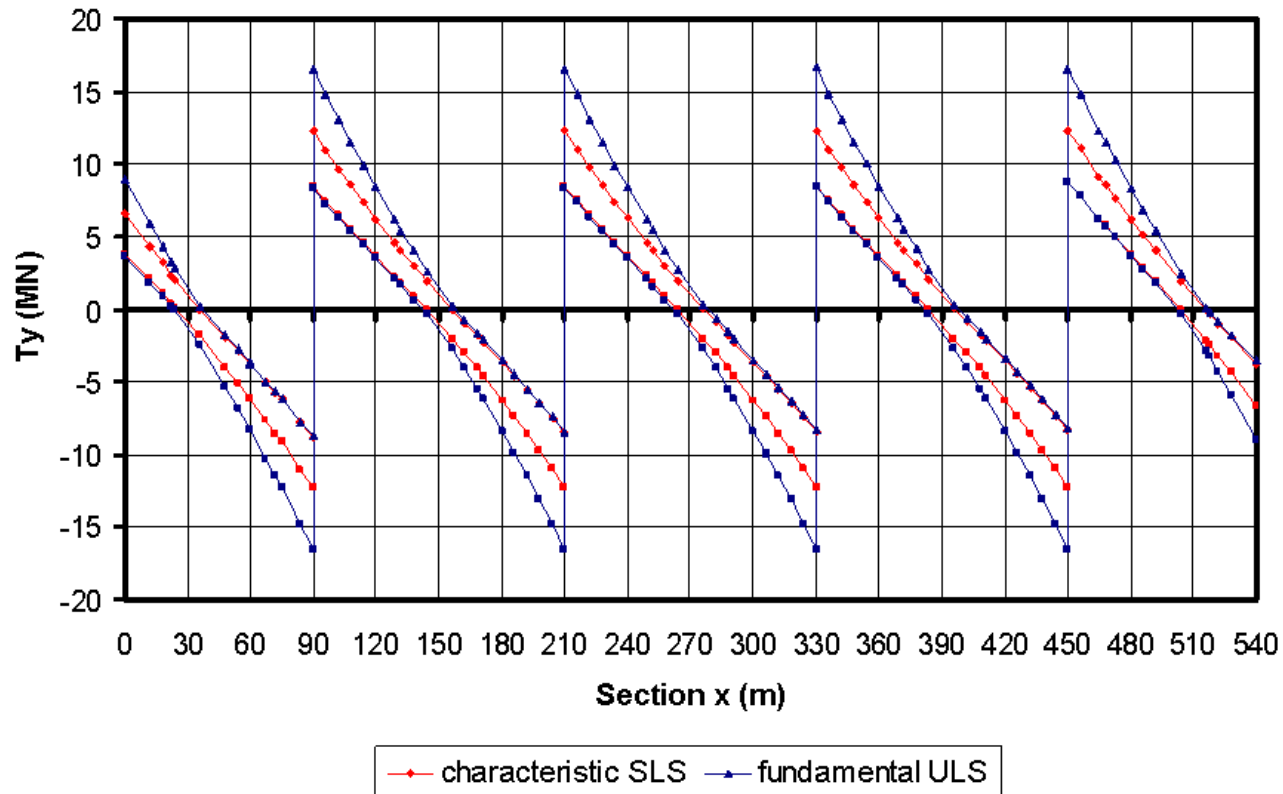
Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 2. Analyse globale du pont caisson mixte en acier-béton

□ Résultats

■ Diagramme de l'effort tranchant





Exemple de dimensionnement n°2:

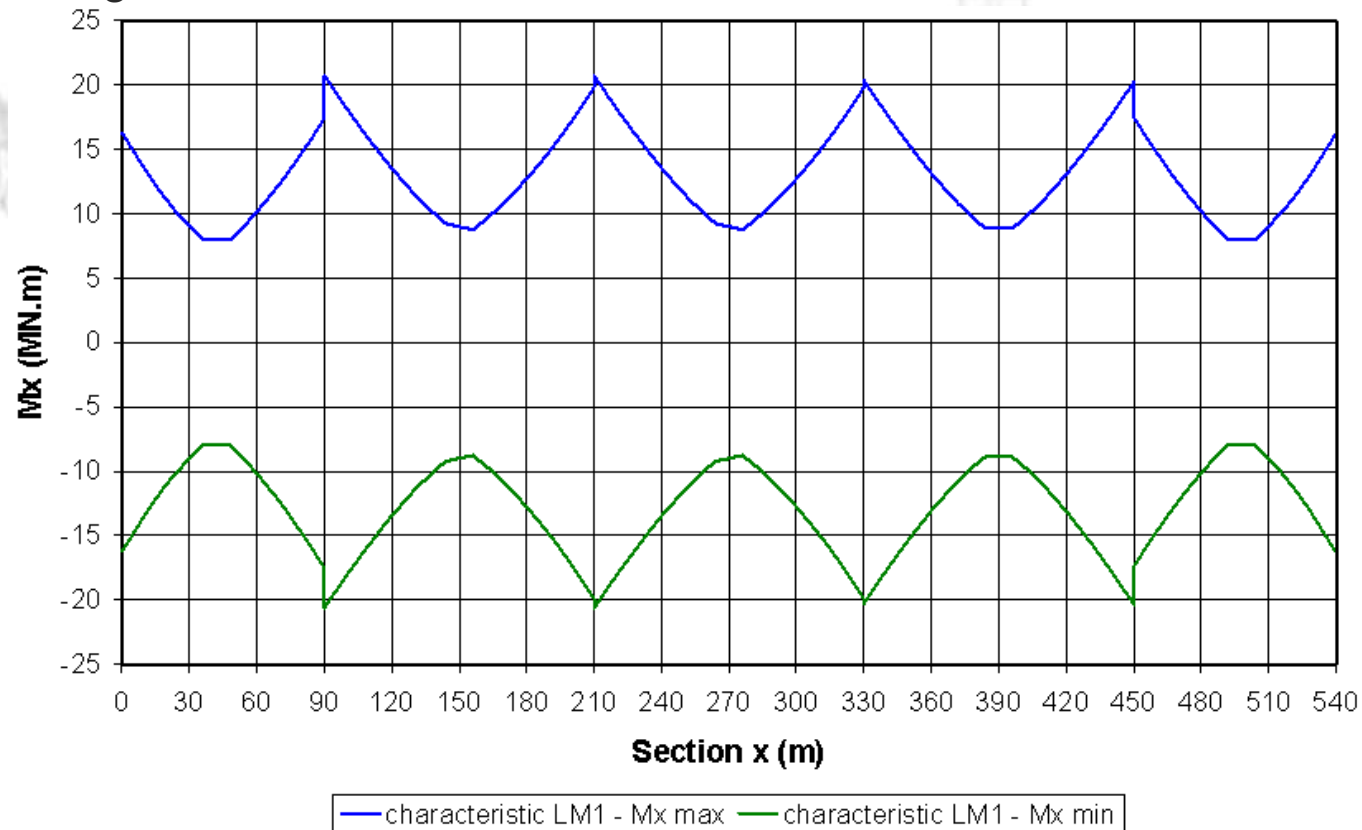
Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 2. Analyse globale du pont caisson mixte en acier-béton

□ Résultats

■ Diagramme des moments de torsion

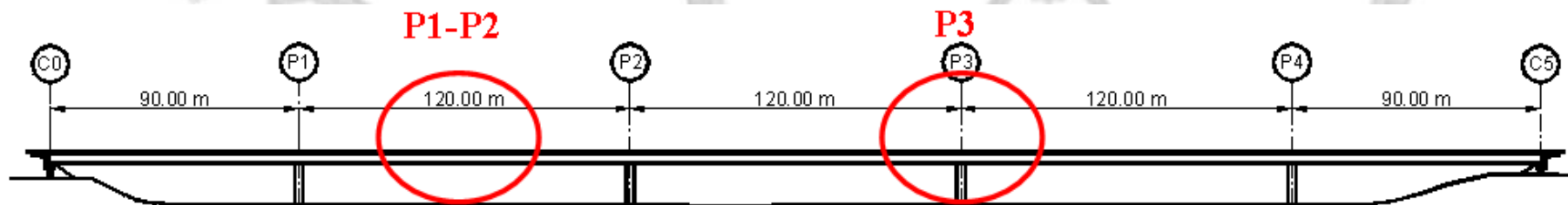




■ 3. Vérification des sections transversales

□ Sections critiques:

Suivant la forme des diagrammes de moment et d'effort tranchant et la position des contreventements transversaux et des raidisseurs, les sections à vérifier sont les suivantes:





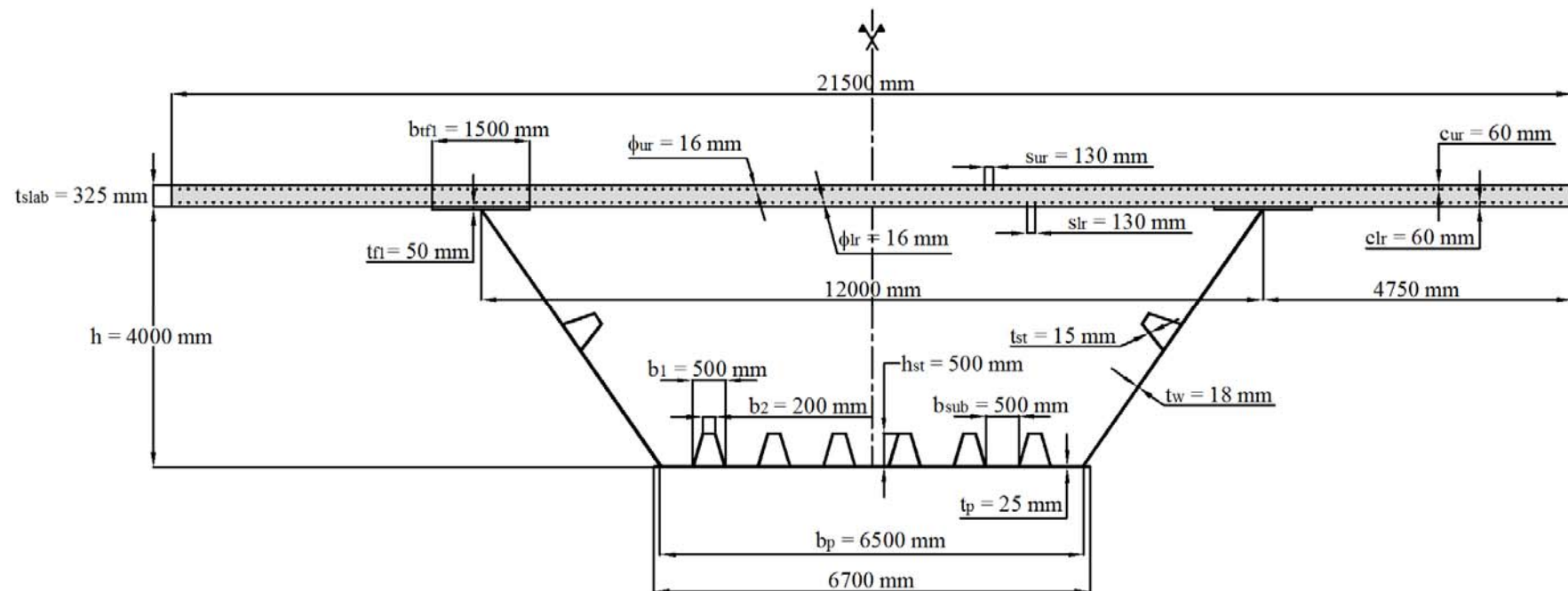
Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 3. Vérification des sections transversales

□ 1. Travée P1-P2 (moment positif):



■ Efforts internes

• $M_{Ed} = 300.822$ MNm (pour la section entière du pont caisson)

• $V_{Ed,projeté} = 3.273$ MN ($V_{Ed, non-projeté} = 2.2.697$ MN = 5.394 MN)



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 1. Travée P1-P2 (moment positif):

- Prise en compte du trainage de cisaillement dans la semelle inférieure:

Portée des travées adjacentes: $L_1 = 120$ m et $L_2 = 120$ m

Longueur efficace: $L_e = 0.7 \cdot L_2 = 0.7 \cdot 120$ m = 84 m

Largeur considérée: $b_0 = b_p/2 = 6.5/2 = 3.25$ m

$b_0 = 3.25$ m < $L_e/50 = 1.68$ m condition non respectée

⇒ Le trainage de cisaillement doit être pris en compte

- Paramètre du trainage de cisaillement

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{2}{b_0 t_p} \frac{A_{sl}}{}} = 1.297$$

$$\kappa = \alpha_0 \frac{b_0}{L_e} = 0.05$$

$$\Rightarrow \beta_{ult} = \frac{1}{1 + 6 \left(\kappa - \frac{1}{2500\kappa} \right) + 1.6\kappa^2} = 0.795$$

$$\Rightarrow \beta_{ult}^\kappa = 0.989$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 1. Travée P1-P2 (moment positif):

■ Détermination de la classe de section

□ Position de l'axe neutre plastique (ANP)

$$N_{abf} + N_{aw} + N_{atf} = 206.484 \text{ MN} \geq N_c = 138.585 \text{ MN} \text{ et}$$

$$N_{abf} + N_{aw} = 156.234 \text{ MN} < N_{atf} + N_c = 188.835 \text{ MN}$$

⇒ ANP est situé dans la semelle supérieure à une distance z_{pl} du bas de la semelle inférieure:

$$z_{pl} = \frac{4hb_{tf}f_{yd}(t_{tf}) + N_c - N_{a.bf} - N_{a.w} - N_{a.tf}}{4b_{tf}f_{yd}(t_{tf})} = 3.967 \text{ m}$$

⇒ Toute l'âme est en traction et la semelle supérieure en compression est maintenue par la dalle

⇒ Section de **CLASSE 1** vérifiée par une analyse plastique



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 1. Travée P1-P2 (moment positif):

- Vérification de la résistance au moment de flexion

- $M_{Ed} = 300.822\text{MNm} \leq M_{pl, Rd} = 524.044\text{MNm}$ **OK**

- Vérification de la résistance à l'effort tranchant

- Pour le coefficient de voilement en cisaillement $k_{\tau, w}$, l'inertie des raidisseurs d'âme $I_{st.w}$ doit être calculée selon **la figure 5.3 de EN1993-1-5**:

$$15 \varepsilon(t_w) t_w = 0.223 \text{ m} \leq b_{1.st.w}/2 = 0.25 \text{ m}$$

- Donc la position de l'axe neutre élastique en prenant en compte une largeur $15 \varepsilon(t_w) t_w$ sur les 2 côtés de chaque âme du raidisseur:

$$z_{st.w} = \frac{2h_{st.w}t_{st.v.w} \left(\frac{h_{st.w} + t_w}{2} \right) + b_{2.st.w}t_{st.w} \left(h_{st.w} + \frac{t_w}{2} \right)}{2h_{st.w}t_{st.v.w} + b_{2.st.w}t_{st.w} + 4 \cdot 15\varepsilon(t_w)t_w} = 0.201 \text{ m}$$



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 3. Vérification des sections transversales

□ 1. Travée P1-P2 (moment positif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

- L'inertie du raidisseur d'âme:

$$I_{st.w} = I_{sl.w} = b_{2.st.w} t_{st.w} (h_{st.w} - z_{st.w})^2 + 2 \left[\frac{t_{st.v.w} h_{st.w}^3}{12} + t_{st.w} h_{st.w} \left(\frac{h_{st.w}}{2} - z_{st.w} \right)^2 \right] + 4 \cdot 15 \varepsilon(t_w) t_w t_w z_{st.w}^2 = 9.462 \cdot 10^4 \text{ m}^4$$

- Selon **l'EN1993-1-5 Annexe 3 (2)**, comme il n'y a qu'un seul raidisseur dans l'âme et que le rapport d'aspect $\alpha_w = \frac{a_w}{h_w} = 0.84 \leq 3$, le coefficient de voilement au cisaillement vaut:

$$k_{\tau.w} = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \frac{I_{sl.w}}{t_w^3 h_w}}{\alpha_w^2} + 2,2 \sqrt[3]{\frac{I_{sl.w}}{t_w^3 h_w}} = 28.858$$

- Le raidisseur transversal du contreventement transversal du panneau d'âme près de la mi-portée P1-P2 est supposé rigide.

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{4763}{18} = 264.617 > \frac{31}{\eta} \varepsilon(t_w) \sqrt{k_{\tau.w}} = 114.536$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 1. Travée P1-P2 (moment positif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

⇒ l'âme doit être vérifiée en terme de voilement par cisaillement

- L'élançement réduit de tout le panneau d'âme vaut:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37.4 t_w \varepsilon(t_w) \sqrt{k_{\tau.w}}} = 1.596$$

- Il est possible que les 2 sous-panneaux d'âmes adjacents soit plus critique que le panneau d'âme principal. Donc, les 2 sous-panneaux d'âmes doivent être vérifié.

- Selon **l'EN1993-1-5 Annexe 3 (1)**, comme le rapport d'aspect

$$\alpha_w = \frac{a_w}{b_{spw}} = \frac{4}{2.016} = 1.984 \geq 1, \text{ le coefficient de voilement au cisaillement}$$

vaut:

$$k_{\tau.w.sp} = 5.34 + 4 \left(\frac{b_{w.sp}}{a_w} \right)^2 = 6.356$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 1. Travée P1-P2 (moment positif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

$$\frac{b_{w.sp}}{t_w} = \frac{2016}{18} = 112.015 > \frac{31}{\eta} \varepsilon(t_w) \sqrt{k_{\tau.w}} = 53.754$$

⇒ l'âme du sous-panneau doit être vérifiée en terme de voilement par cisaillement

- L'élançement réduit du sous-panneau d'âme:

$$\bar{\lambda}_{w.sp} = \frac{b_{w.sp}}{37.4 t_w \varepsilon(t_w) \sqrt{k_{\tau.w.sp}}} = 1.439$$

⇒ Le panneau d'âme entier est le plus critique

$$\bar{\lambda}_w = \max(\bar{\lambda}_w, \bar{\lambda}_{w.sp}) = 1.596$$

- Comme le panneau d'âme près de la mi-travée P1-P2 est supposé rigide et $1.08 \leq \lambda_w$, le facteur de réduction vaut:

$$\chi_w = \frac{1.37}{(0.7 + \bar{\lambda}_w)} = 0.597$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 1. Travée P1-P2 (moment positif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

- La résistance de dimensionnement maximum au cisaillement est donnée par: $V_{Rd} = \min (V_{b,Rd} ; V_{pl,a,Rd})$

où:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} = \min \left(\frac{\chi_w f_y (t_w) h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} ; \frac{\eta f_y (t_w) h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \right) = 9.265 \text{ MN}$$

$$V_{pl,a,Rd} = \frac{\eta f_y (t_w) h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = 20.493 \text{ MN}$$

$$\Rightarrow \eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{3.273}{9.265} = 0.353 \leq 1$$

- La section est vérifiée à l'effort tranchant



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 1. Travée P1-P2 (moment positif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

□ Ajout de l'effet du moment torsionnel

- Le moment de torsion maximum à mi-travée P1-P2 vaut $M_T = 1.35.8.774 \text{ MN} = 11.845 \text{ MN.m}$

- L'aire comprise à l'intérieur de la ligne médiane de la section du pont caisson vaut:

$$S = \frac{(b_t + b_p) \left(h + \frac{t_{slab}}{2} \right)}{2} = \frac{(12 + 6.5) \left(4 + \frac{0.325}{2} \right)}{2} = 38.503 \text{ m}^3$$

- La contrainte de cisaillement dans l'âme vaut par la Formule de Bredt:

$$\tau_{Ed,T,web} = \frac{M_T}{2St_w} = 8.545 \text{ MPa}$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 1. Travée P1-P2 (moment positif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

□ Ajout de l'effet du moment torsionnel

- L'effort tranchant dans l'âme du à la torsion

$$V_{Ed,T,web} = \tau_{Ed,T,web} t_w h_w = 0.733 \text{ MN}$$

- La vérification au cisaillement incluant l'effet du moment de torsion:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed} + V_{T,web}}{V_{Rd}} = \frac{3.273 + 0.733}{9.265} = 0.432 \leq 1$$

■ Interaction moment – effort tranchant (interaction M-V)

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} = 0.432 \leq 0.5$$

⇒ il n'y a pas lieu de vérifier l'interaction M-V.



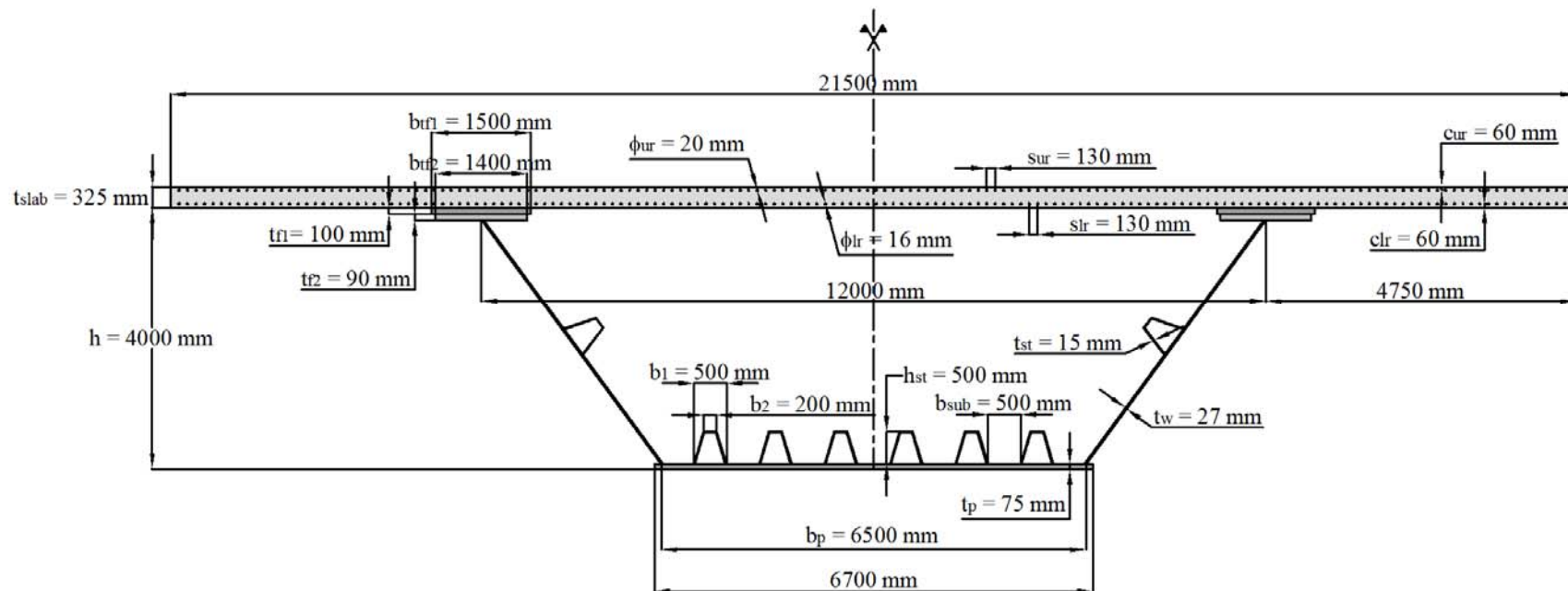
Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):



■ Efforts internes

• $M_{Ed} = -739.778$ MNm (sur l'appui intermédiaire P3)

• $V_{Ed,projeté} = 20.165$ MN ($V_{Ed,non-projeté} = 2.16.617$ MN = 33.234 MN)



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Propriétés mécaniques de la section transversale **brute**

• Aire totale A_{tot} :

$$A_{tot} := A_{tsur} + A_{tslr} + 2 \cdot (b_{tf.1} \cdot t_{tf.1} + b_{tf.2} \cdot t_{tf.2}) + 2 \cdot [(h - t_{tf.1} - t_{tf.2} - t_p) \cdot t_w \cdot h + A_{st.w}] \dots \\ + n_{st} \cdot [t_{st} \cdot (b_2 + 2 \cdot b_3) + t_p \cdot (b_1 + b_{sub})] + (b_{sub} + 0.2m) \cdot t_p$$

$$A_{tot} = 1.532 \text{ m}^2$$

• Moment statique S_{na} :

$$S_{na} = 3.081 \text{ m}^3$$

• Position du centre de gravité par rapport à la face inférieure de la semelle inférieure z_{na} :

$$z_{na} = S_{na} / A_{tot} = 2.011 \text{ m}$$

• Inertie totale I_{tot} :

$$I_{tot} = 5.014 \text{ m}^4$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Forces internes et moment de flexion

- La contrainte maximum à l'ULS dans les armatures supérieures donnés par l'analyse globale pour le comportement fissuré: $\sigma_{sup.reinf} = -144.604$ MPa

- Le moment de flexion $M_{c,Ed}$ appliqué à la section mixte (caisson acier + armatures):

$$M_{c,Ed} = \frac{\sigma_{sup.reinf} I_{tot}}{h + t_{slab} - c_{ur} - z_{na}} = -321.637 \text{ MNm}$$

- Le moment de flexion M_a appliqué au caisson acier seul:

$$M_{a,Ed} = M_{Ed} - M_{c,Ed} = -739.778 \text{ MNm} - (-321.637 \text{ MNm}) = -418.141 \text{ MNm}$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

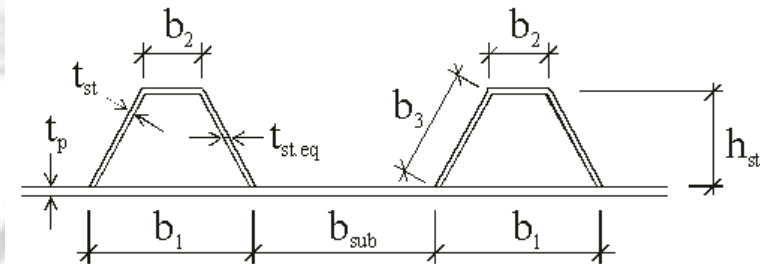
■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Géométrie du panneau

- Nombre de raidisseurs: $n_{st} = 6$
- Longueur du panneau: $a_p = 4$ m
- Largeur du panneau: $b_p = 6.5$ m
- Epaisseur du panneau : $t_p = 75$ mm

□ Géométrie des raidisseurs

- Distance entre les âmes du raidisseur: $b_1 = 0.5$ m
- Largeur de semelle du raidisseur: $b_2 = 0.2$ m
- Hauteur du raidisseur: $h_{st} = 0.4925$ m
- Epaisseur du raidisseur: $t_{st} = 15$ mm





Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Géométrie des raidisseurs

- Largeur de chaque sous-panneau:

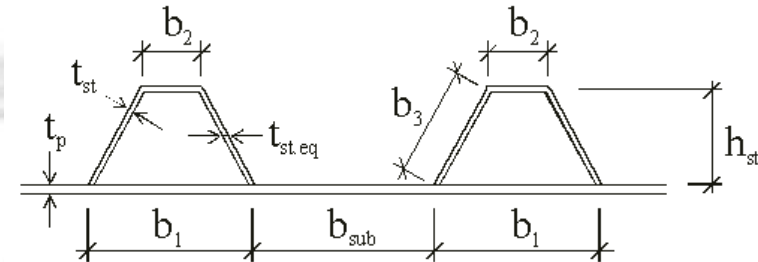
$$b_{sub} = \frac{b_p - n_{st} b_1}{(n_{st} + 1)} = 0.5 \text{ m}$$

- Largeur de chaque âme du raidisseur:

$$b_3 = \sqrt{h_{st}^2 + \left(\frac{b_1 - b_2}{2}\right)^2} = 0.515 \text{ m}$$

- Epaisseur équivalente de l'âme du raidisseur:

$$t_{st.eq} = t_{st} \frac{b_3}{h_{st}} = 15.68 \text{ m}$$





■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Section transversale efficace des sous-panneaux et raidisseurs

- Distribution des contraintes: $\Psi = 1$
- Facteur de voilement pour des éléments internes en compression:

$$k_{\sigma} = 4$$

- Elancement des plaques analysées:

$$\bar{\lambda}_{local}(b, t) = \frac{b}{t \cdot 28.4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}}$$

- Facteur de réduction pour des éléments internes en compression:

$$\text{si } \bar{\lambda}_{local}(b, t) \leq 0.673 \Rightarrow \rho_{local}(b, t) = 1$$

$$\text{si } \bar{\lambda}_{local}(b, t) > 0.673 \Rightarrow \rho_{local}(b, t) = \frac{\bar{\lambda}_{local}(b, t) - 0.22}{\bar{\lambda}_{local}(b, t)^2}$$



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

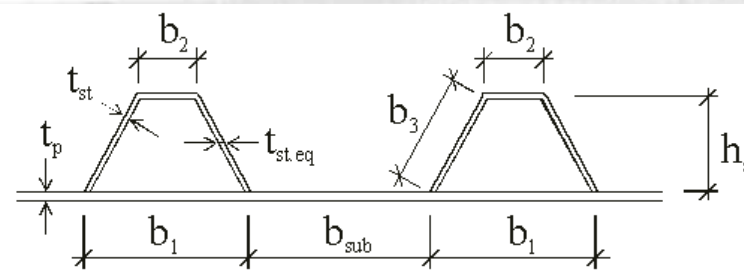
COMBRI+

■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Section transversale efficace des sous-panneaux et raidisseurs



Panel	b	t	$\bar{\lambda}_{local}$	ρ_{local}	b _{eff}
1	0.5 m	75 mm	0.138	1.000	0.5 m
2	0.2 m	15 mm	0.289	1.000	0.2 m
3	0.515 m	15 mm	0.743	0.948	0.488 m
sub	0.5 m	75 mm	0.138	1.000	0.5 m



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Section transversale efficace des sous-panneaux et raidisseurs

• Aire locale efficace sans bord

$$A_{c,eff.loc} := n_{st} \cdot [t_{st} \cdot (b_{2,eff} + 2 \cdot b_{3,eff}) + t_p \cdot (b_{1,eff} + b_{sub,eff})] = 0.556 \text{ m}^2$$

• Aire brute sans bord

$$A_c := n_{st} \cdot [t_{st} \cdot (b_2 + 2 \cdot b_3) + t_p \cdot (b_1 + b_{sub})] = 0.561 \text{ m}^2$$

□ Section transversale efficace de la semelle inférieure entière

• Détermination de la contrainte critique élastique de voilement de plaque

$$z_{sl} := \frac{n_{st} \cdot \left[(h_{st} + t_p) t_{st,eq} \cdot h_{st} + \left(h_{st} + \frac{t_p - t_{st}}{2} \right) \cdot t_{st} \cdot b_2 \right]}{A_c} = 63.674 \cdot \text{mm}$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Section transversale efficace de la semelle inférieure entière

• Détermination de la contrainte critique élastique de voilement de plaque

$$I_{sl} := n_{st} \cdot \left[2 \cdot \left[\frac{h_{st}^3 \cdot t_{st.eq}}{12} + h_{st} \cdot t_{st.eq} \cdot \left(\frac{h_{st}}{2} - z_{sl} \right)^2 \right] + \frac{t_{st}^3 \cdot b_2}{12} + b_2 \cdot t_{st} \cdot (h_{st} - z_{sl})^2 \right] \dots$$
$$+ \frac{b_p \cdot t_p^3}{12} + b_p \cdot t_p \cdot z_{sl}^2 \quad I_{sl} = 1.048 \times 10^6 \cdot \text{cm}^4$$

$$I_p := \frac{b_p \cdot t_p^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = 2.511 \times 10^4 \cdot \text{cm}^4$$

$$A_{sl} := n_{st} \cdot t_{st} \cdot (b_2 + 2 \cdot b_3) = 1.107 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_p := b_p \cdot t_p = 4.875 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Section transversale efficace de la semelle inférieure entière

• Détermination de la contrainte critique élastique de voilement de plaque

$$\gamma := \frac{I_{sl}}{I_p} = 41.724$$

$$\delta := \frac{A_{sl}}{A_p} = 0.227$$

$$\alpha := \frac{a_p}{b_p} = 0.615 = 0.5$$

$$k_{\sigma,p} := \begin{cases} \frac{2 \cdot \left[(1 + \alpha^2)^2 + \gamma - 1 \right]}{\alpha^2 \cdot (\psi + 1) \cdot (1 + \delta)} & \text{if } \alpha \leq \sqrt[4]{\gamma} \\ \frac{4 \cdot (1 + \sqrt{\gamma})}{(\psi + 1) \cdot (1 + \delta)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{\sigma,p} = 91.732$$

• Euler's stress

$$\sigma_E := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t_p^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_p^2} = 25.3 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Section transversale efficace de la semelle inférieure entière

• Détermination de la contrainte critique élastique de voilement de plaque

• La contrainte critique élastique de voilement de la plaque équivalente:

$$\sigma_{cr,p} := k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E = 2304.8 \cdot N \cdot mm^{-2}$$

• Comportement de type plaque

• Facteur de réduction $\beta_{A.c}$: $\beta_{A.c} := \frac{A_{c,eff.loc}}{A_c} = 0.991$

• Elancement relatif de la plaque équivalente λ_p : $\lambda_p := \sqrt{\frac{\beta_{A.c} \cdot f_y(t_p)}{\sigma_{cr,p}}} = 0.374$

• Facteur de réduction ρ_p pour éléments internes en compression:

$$\bar{\lambda}_p = 0.374 \leq 0.673 \Rightarrow \rho_p = 1 \Rightarrow \text{pas de réduction}$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Section transversale efficace de la semelle inférieure entière

• Comportement de type colonne

• Section **brute** efficace du raidisseur:

$$b_{1.sl} := (b_{sub} + b_1) = 1 \text{ m}$$

$$A_{sl.1} := t_{st} \cdot (b_2 + 2 \cdot b_3) + t_p \cdot b_{1.sl} = 9.345 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

$$z_{sl.1} := \frac{(h_{st} + t_p) t_{st.eq} \cdot h_{st} + \left(h_{st} + \frac{t_p - t_{st}}{2} \right) \cdot t_{st} \cdot b_2}{A_{sl.1}} = 63.674 \cdot \text{mm}$$

$$I_{sl.1} := \left[2 \cdot \left[\frac{h_{st}^3 \cdot t_{st.eq}}{12} + h_{st} \cdot t_{st.eq} \cdot \left(\frac{h_{st}}{2} - z_{sl.1} \right)^2 \right] + \frac{t_{st}^3 \cdot b_2}{12} + b_2 \cdot t_{st} \cdot (h_{st} - z_{sl.1})^2 \right] \dots$$
$$+ \frac{b_{1.sl} \cdot t_p^3}{12} + b_{1.sl} \cdot t_p \cdot z_{sl.1}^2 \quad I_{sl.1} = 1.718 \times 10^9 \cdot \text{mm}^4$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Section transversale efficace de la semelle inférieure entière

• Comportement de type colonne

• Section **nette** efficace du raidisseur:

$$b_{1.sl.eff} := (b_{sub.eff} + b_{1.eff}) = 1 \text{ m}$$

$$A_{sl.1.eff} := t_{st} \cdot (b_{2.eff} + 2 \cdot b_{3.eff}) + t_p \cdot b_{1.sl.eff} = 9.264 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

• La contrainte critique élastique de voilement pour une colonne équivalente:

$$\sigma_{cr.sl} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl.1}}{A_{sl.1} \cdot a_p^2} = 2381.6 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

• Le facteur de réduction $\beta_{A.c}$:

$$\beta_{A.c} := \frac{A_{sl.1.eff}}{A_{sl.1}} = 0.991$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Section transversale efficace de la semelle inférieure entière

• Comportement de type colonne

• Elancement relatif de colonne:

$$\lambda_c := \sqrt{\frac{\beta_{A.c.} \cdot f_y(t_p)}{\sigma_{cr.sl}}} = 0.368$$

$$i := \sqrt{\frac{I_{sl.1}}{A_{sl.1}}} = 0.136 \text{ m}$$

• Facteur d'imperfection α_e :

$$\alpha_e := \alpha_0 + \frac{0.09}{\frac{i}{e}} = 0.513$$

$$e_1 := \frac{t_p}{2} + \frac{h_{st}(t_{st.eq} \cdot h_{st} + t_{st} \cdot b_2)}{(2t_{st.eq} \cdot h_{st} + t_{st} \cdot b_2)} - z_{sl.1} = 260.127 \cdot \text{mm}$$

$$e_2 := z_{sl.1} = 63.674 \cdot \text{mm}$$

$$e := \begin{cases} e_1 & \text{if } e_1 \geq e_2 \\ e_2 & \text{otherwise} \end{cases}$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Section transversale efficace de la semelle inférieure entière

• Comportement de type colonne

- Facteur de réduction pour le flambement de colonne:

$$\chi_c(\phi) := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_c < 0.2 \\ \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_c^2}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\phi := 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_e \cdot (\lambda_c - 0.2) + \lambda_c^2 \right] = 0.611$$

$$\chi_{c,v} := \chi_c(\phi) = 0.911$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Section transversale efficace de la semelle inférieure entière

• Interaction entre le comportement plaque et colonne

• Facteur de poids ξ :
$$\xi := \frac{\sigma_{cr.p}}{\sigma_{cr.sl}} - 1$$

$$\xi = 0$$

• Facteur de réduction final ρ_c :

$$\rho_c := (\rho_p - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 0.911$$

• Aire efficace de la zone comprimée:

$$A_{c,eff} := \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + b_{sub,eff} \cdot t_p = 5.437 \times 10^5 \text{ mm}^2$$



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 3. Vérification des sections transversales

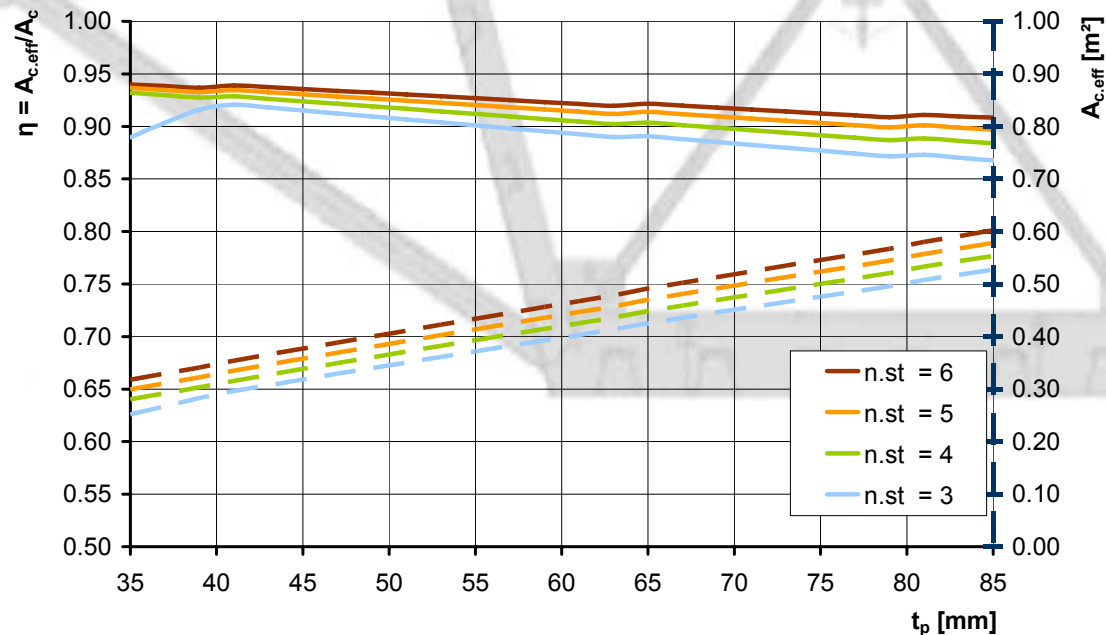
□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Etude paramétrique

- La figure suivante résume les résultats pour une variation du nombre de raidisseur n_{st} et l'épaisseur de la semelle inférieure t_p

Niveau
d'utilisation



Aire efficace



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de la semelle inférieure

□ Etude paramétrique

- Lorsque l'épaisseur de la semelle inférieure t_p augmente, la contrainte critique de voilement σ_p augmente ainsi que le facteur de réduction ρ_c
⇒ La géométrie des raidisseurs étant fixé, lorsque l'épaisseur de la semelle inférieure t_p augmente, l'effet des raidisseurs se fait moins ressentir
- Lorsque l'épaisseur de la semelle inférieure t_p augmente, la limite élastique f_y diminue et donc l'élancement λ_p augmente (ce qui explique la non-linéarité des lignes continues).
- Lorsque l'épaisseur de la semelle inférieure t_p augmente, l'aire effective $A_{c,eff}$ augmente et donc la force maximum axial dans la semelle inférieure augmente (lignes discontinues).
- A part pour le cas où $t_p = 35$ mm et $n_{st} = 3$, il n'y a pas de réduction du au voilement local de la semelle inférieure
- En augmentant l'épaisseur de la semelle inférieure t_p de 8 mm, le nombre de raidisseurs peut être réduit à 4 raidisseurs. ⇒ bénéfique au niveau des soudures



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

- Prise en compte du trainage de cisaillement dans la semelle inférieure:

Portée des travées adjacentes: $L_1 = 120$ m et $L_2 = 120$ m

Longueur efficace: $L_e = 0.25.(L_1 + L_2) = 0.25.(120+120) = 60$ m

Largeur considérée: $b_0 = b_p/2 = 6.5/2 = 3.25$ m

$b_0 = 3.25$ m $< L_e/50 = 1.2$ m condition non respectée

⇒ Le trainage de cisaillement doit être pris en compte

- Paramètre du trainage de cisaillement

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{2}{b_0 t_p} \frac{A_{sl}}{}} = 1.108$$

$$\kappa = \alpha_0 \frac{b_0}{L_e} = 0.06$$

$$\Rightarrow \beta_{ult} = \frac{1}{1 + 6 \left(\kappa - \frac{1}{2500\kappa} \right) + 1.6\kappa^2} = 0.754$$

$$\Rightarrow \beta_{ult}^\kappa = 0.983$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

- Aire efficace de la semelle inférieure raidie:

$$A_{\text{effEP}} := A_{\text{c.eff}} \cdot \beta_{\text{ult}}^{\kappa} = 0.535 \text{ m}^2$$

- **Nouvelles propriétés mécaniques** de la section transversale

□ **Nouvelles propriétés mécaniques de la partie acier structurelle (seul)**

- Aire totale $A_{\text{tot.a.eff}}$:

$$A_{\text{tot.a.eff}} := A_{\text{effEP}} + 2 \cdot (h - t_{\text{tf.1}} - t_{\text{tf.2}} - t_{\text{p}}) \cdot t_{\text{w.h}} + 2 \cdot (b_{\text{tf.1}} \cdot t_{\text{tf.1}} + b_{\text{tf.2}} \cdot t_{\text{tf.2}})$$

$$A_{\text{tot.a.eff}} = 1.331 \text{ m}^2$$

- Moment statique $S_{\text{a.na}}$:

$$S_{\text{a.na}} = 2.666 \text{ m}^3$$

- Inertie totale $I_{\text{tot.a.eff}}$:

$$I_{\text{tot.a.eff}} = 4.308 \text{ m}^4$$

- Position du centre de gravité par rapport à la face inférieure de la semelle inférieure $z_{\text{tot.a.na}}$:

$$z_{\text{tot.a.na}} = S_{\text{a.na}} / A_{\text{tot.a.eff}} = 2.003 \text{ m}$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ **Nouvelles propriétés mécaniques** de la section transversale

□ **Nouvelles propriétés mécaniques** de la **section mixte**

- Aire totale $A_{tot.eff}$:

$$A_{tot.eff} := A_{tot.a.eff} + A_{tsur} + A_{tslr} = 1.416 \text{ m}^2$$

- Moment statique S_{na} :

$$S_{na} = 3.023 \text{ m}^3$$

- Position du centre de gravité par rapport à la face inférieure de la semelle inférieure $z_{tot.na}$:

$$z_{tot.na} = S_{na} / A_{tot.eff} = 2.134 \text{ m}$$

- Inertie totale $I_{tot.eff}$:

$$I_{tot.eff} = 4.69 \text{ m}^4$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Aire efficace de l'âme

- A partir des valeurs des moments de flexion M_a et M_c et des propriétés mécaniques, les contraintes normales extrêmes dans l'âme du caisson à l'ULS:

$$\sigma_{abfu} = \frac{-M_a (z_{tot.a.na} - t_p)}{I_{tot.a.eff}} + \frac{-M_c (z_{tot.na} - t_p)}{I_{tot.eff}} = 328.263 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{atfl} = \frac{M_a (h - t_{tf.1} - t_{tf.2} - z_{tot.a.na})}{I_{tot.a.eff}} + \frac{M_c (h - t_{tf.1} - t_{tf.2} - z_{tot.na})}{I_{tot.eff}} = -290.373 \text{ MPa}$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Détermination de la classe de section

- L'âme de la poutre est au moins de classe 3 et donc l'analyse sera basée sur la distribution élastique des contraintes à l'ELU:

$$\psi_w = \frac{\sigma_{atfl}}{\sigma_{abfu}} = \frac{-290.373}{328.263} = -0.885 > -1$$

- La limite d'élancement entre la classe 3 et la classe 4:

$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{h_w}{t_w} = 167.872 > \frac{42\varepsilon}{0.67 + 0.33\psi_w} = 91.681 \Rightarrow \text{l'âme est de classe 4}$$

⇒ Section de **CLASSE 4** vérifiée par une analyse élastique

■ Ame en flexion

$$\Rightarrow k_{\sigma_w} = 5.98(1 - \psi)^2 = 24.953$$

(Table 4.1 of EN1993-1-5, 4.4: parois comprimées internes)



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Âme en flexion

$$\bar{\lambda}_{pw} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{h_w/t_w}{28,4\varepsilon_w\sqrt{k_{\sigma w}}} = 1.562 > 0.673 \Rightarrow \rho_w = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi_w)}{\bar{\lambda}_p^2} = 0.593$$

⇒ Il y a une réduction de l'âme du caisson acier

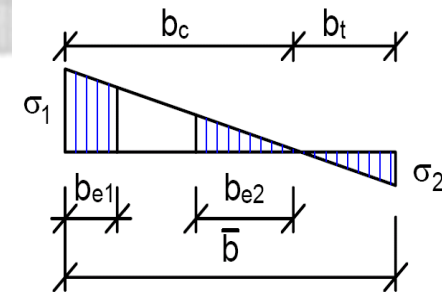
- La hauteur efficace de l'âme en compression:

$$h_{weff} = \frac{\rho_w h_w}{(1 - \psi_w)} = 1.425 \text{ m}$$

- Cette hauteur efficace de l'âme en compression peut être distribuée selon **la Table 4.1 de EN1993-1-5**:

$$h_{we1} = \left(\frac{-\psi_w}{1 - \psi_w} \right) \cdot h_w + 0.6h_{weff} = 2.127 + 0.855 = 2.982 \text{ m}$$

$$h_{we2} = 0.4h_{weff} = 0.57 \text{ m}$$





■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Propriétés mécaniques **efficaces finales** de la section transversale

□ Propriétés mécaniques **efficaces finales** de la **partie acier structurelle (seul)**

- Aire totale $A_{tot.a.eff}$: $A_{eff.w} := (h_{w.e1} + h_{w.e2}) \cdot t_w = 0.096 \text{ m}^2$

$$A_{tot.a.eff} := A_{effEP} + 2 \cdot A_{eff.w} + 2(b_{tf.1} \cdot t_{tf.1} + b_{tf.2} \cdot t_{tf.2}) = 1.278 \text{ m}^2$$

- Moment statique $S_{a.na}$:

$$S_{a.na} = 2.613 \text{ m}^3$$

- Position du centre de gravité par rapport à la face inférieure de la semelle inférieure $z_{tot.a.na}$:

$$z_{tot.a.na} = S_{a.na} / A_{tot.a.eff} = 2.044 \text{ m}$$

- Inertie totale $I_{tot.a.eff}$:

$$I_{tot.a.eff} = 4.244 \text{ m}^4$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Propriétés mécaniques **efficaces finales** de la section transversale

□ Propriétés mécaniques **efficaces finales** de la section mixte

- Aire totale $A_{tot.eff}$:

$$A_{tot.eff} := A_{tot.a.eff} + A_{tsur} + A_{tslr} = 1.364 \text{ m}^2$$

- Moment statique S_{na} :

$$S_{na} = 2.97 \text{ m}^3$$

- Position du centre de gravité par rapport à la face inférieure de la semelle inférieure $z_{tot.na}$:

$$z_{tot.na} = S_{na} / A_{tot.eff} = 2.178 \text{ m}$$

- Inertie totale $I_{tot.eff}$:

$$I_{tot.eff} = 4.61 \text{ m}^4$$



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Vérification de la résistance au moment de flexion

□ Les contraintes à chaque niveau de la section transversale:

$$\sigma_{abfl} = \frac{-M_a(z_{tot.a.na})}{I_{tot.a.eff}} + \frac{-M_c(z_{tot.na})}{I_{tot.eff}} = 353.374 \text{ MPa} \leq f_{yd}(t_p) = \frac{f_y(t_p)}{\gamma_{M0}} = 325 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{atf2l} = \frac{M_a(h - t_{tf.1} - t_{tf.2} - z_{tot.a.na})}{I_{tot.a.eff}} + \frac{-M_c(h - t_{tf.1} - t_{tf.2} - z_{tot.na})}{I_{tot.eff}} = |-287.808 \text{ MPa}| \leq f_{yd}(t_{f.2}) = \frac{f_y(t_{f.2})}{\gamma_{M0}} = 315 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{atf1l} = \frac{M_a(h - t_{tf.1} - z_{tot.a.na})}{I_{tot.a.eff}} + \frac{-M_c(h - t_{tf.1} - z_{tot.na})}{I_{tot.eff}} = |-302.954 \text{ MPa}| \leq f_{yd}(t_{f.1}) = \frac{f_y(t_{f.1})}{\gamma_{M0}} = 315 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{atfu} = \frac{M_a(h - z_{tot.a.na})}{I_{tot.a.eff}} + \frac{-M_c(h - z_{tot.na})}{I_{tot.eff}} = |-319.783 \text{ MPa}| \leq f_{yd}(t_{f.1}) = \frac{f_y(t_{f.1})}{\gamma_{M0}} = 315 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s.reinf} = \frac{-M_c(h + t_{slab} - c_{ur} - z_{tot.na})}{I_{tot.eff}} = |-145.599 \text{ MPa}| \leq f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_{M0}} = 434.783 \text{ MPa}$$

⇒ La résistance au moment de flexion est gouvernée par la résistance la semelle inférieure: $\eta_1 = \frac{|\sigma_{abfl}|}{f_{yd}(t_p)} = 1.087 \geq 1$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

- Pour le coefficient de voilement en cisaillement $k_{\tau,w}$, l'inertie des raidisseurs d'âme $I_{st,w}$ doit être calculée selon **la figure 5.3 de EN1993-1-5**:

$$15 \varepsilon(t_w) t_w = 0.334 \text{ m} \geq b_{1,st,w}/2 = 0.25 \text{ m}$$

- Donc la position de l'axe neutre élastique en prenant en compte une largeur $15 \varepsilon(t_w) t_w$ sur un côté de chaque âme du raidisseur et de $b_{1,st,w}$:

$$z_{st,w} = \frac{2h_{st,w} t_{st,v,w} \frac{t_w + h_{st,w}}{2} + b_{2,st,w} t_{st,w} \left(h_{st,w} + \frac{t_w}{2} \right)}{2h_{st,w} t_{st,v,w} + b_{2,st,w} t_{st,w} + (2 \cdot 15 \varepsilon(t_w) t_w + b_{1,st,w}) t_w} = 0.111 \text{ m}$$

- L'inertie du raidisseur:

$$I_{st,w} = I_{sl,w} = b_{2,st,w} t_{st,w} (h_{st,w} - z_{st,w})^2 + 2 \left[\frac{t_{st,v,w} h_{st,w}^3}{12} + t_{st,w} h_{st,w} \left(\frac{h_{st,w}}{2} - z_{st,w} \right)^2 \right] + [2 \cdot 15 \varepsilon(t_w) t_w + b_{1,st,w}] t_w z_{st,w}^2 = 1.215 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

- Selon **l'EN1993-1-5 Annexe 3 (2)**, comme il n'y a qu'un seul raidisseur dans l'âme et que le rapport d'aspect $\alpha_w = \frac{a_w}{h_w} = 0.552 \leq 3$, le coefficient de voilement au cisaillement vaut:

$$k_{\tau,w} = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \frac{I_{sl,w}}{t_w^3 h_w}}{\alpha_w^2} + 2,2 \sqrt[3]{\frac{I_{sl,w}}{t_w^3 h_w}} = 38.119$$

- Le raidisseur transversal du contreventement transversal du panneau d'âme sur appui intermédiaire P3 est supposé rigide.

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{4533}{27} = 167.872 > \frac{31}{\eta} \varepsilon(t_w) \sqrt{k_{\tau,w}} = 131.636$$

⇒ l'âme doit être vérifiée en terme de voilement par cisaillement



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

- L'élancement réduit de tout le panneau d'âme vaut:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37.4 t_w \varepsilon(t_w) \sqrt{k_{\tau,w}}} = 0.881$$

- Il est possible que les 2 sous-panneaux d'âmes adjacents soit plus critique que le panneau d'âme principal. Donc, les 2 sous-panneaux d'âmes doivent être vérifié.

- Selon **l'EN1993-1-5 Annexe 3 (1)**, comme le rapport d'aspect

$\alpha_w = \frac{a_w}{b_{spw}} = \frac{2.5}{2.016} = 1.24 \geq 1$, le coefficient de voilement au cisaillement vaut:

$$k_{\tau,w.sp} = 5.34 + 4 \left(\frac{b_{w.sp}}{a_w} \right)^2 = 7.942$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

$$\frac{b_{w.sp}}{t_w} = \frac{2016}{27} = 74.677 > \frac{31}{\eta} \varepsilon(t_w) \sqrt{k_{\tau.w}} = 60.085$$

⇒ l'âme du sous-panneau doit être vérifiée en terme de voilement par cisaillement

- L'élancement réduit du sous-panneau d'âme:

$$\bar{\lambda}_{w.sp} = \frac{b_{w.sp}}{37.4 t_w \varepsilon(t_w) \sqrt{k_{\tau.w.sp}}} = 0.858$$

⇒ Le panneau d'âme entier est le plus critique

$$\bar{\lambda}_w = \max(\bar{\lambda}_w, \bar{\lambda}_{w.sp}) = 0.881$$

- Comme le panneau d'âme sur l'appui intermédiaire P3 est supposé rigide et $0.8 \leq \lambda_w \leq 1.08$, le facteur de réduction vaut:

$$\chi_w = \frac{0.83}{\bar{\lambda}_w} = 0.942$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

- La résistance de dimensionnement maximum au cisaillement est donnée par: $V_{Rd} = \min (V_{b,Rd} ; V_{pl,a,Rd})$

où:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} = \min \left(\frac{\chi_w f_y(t_w) h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} ; \frac{\eta f_y(t_w) h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \right) = 20.881 \text{ MN}$$

$$V_{pl,a,Rd} = \frac{\eta f_y(t_w) h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = 29.251 \text{ MN}$$

$$\Rightarrow \eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{20.165}{20.881} = 0.966 \leq 1$$

⇒ La section est vérifiée à l'effort tranchant



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

□ Ajout de l'effet du moment torsionnel

- Le moment de torsion maximum sur appui P3 vaut $M_T = 1.35.20.761$ MN = 28.027 MN.m
- L'aire comprise à l'intérieur de la ligne médiane de la section du pont caisson vaut:

$$S = \frac{(b_t + b_p) \left(h + \frac{t_{slab}}{2} \right)}{2} = \frac{(12 + 6.5) \left(4 + \frac{0.325}{2} \right)}{2} = 38.503 \text{ m}^3$$

- La contrainte de cisaillement dans l'âme vaut par la Formule de Bredt:

$$\tau_{Ed,T,web} = \frac{M_T}{2St_w} = 13.48 \text{ MPa}$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

□ Ajout de l'effet du moment torsionnel

- L'effort tranchant dans l'âme du à la torsion

$$V_{Ed,T,web} = \tau_{Ed,T,web} t_w h_w = 1.65 \text{ MN}$$

- La vérification au cisaillement incluant l'effet du moment de torsion:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed} + V_{T,web}}{V_{Rd}} = \frac{20.165 + 1.65}{20.881} = 1.045 > 1$$

□ Vérification à l'effort tranchant incluant l'effet torsionnel

- L'aire de cisaillement du caisson:

$$A_v = h_w t_w = 0.122 \text{ m}^2$$

- La résistance plastique à l'effort tranchant:

$$V_{pl.Rd} = \frac{\eta A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = 29.251 \text{ MN}$$



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Vérification de la résistance à l'effort tranchant

□ Vérification à l'effort tranchant incluant l'effet torsionnel

- La résistance plastique à l'effort tranchant réduite:

$$V_{pl.T.Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t.Ed}}{\left(f_y / \sqrt{3} \right) / \gamma_{M0}} \right] V_{pl.Rd} = 27.272 \text{ MN}$$

- La vérification au cisaillement incluant l'effet du moment de torsion:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl.T.Rd}} = \frac{20.165}{27.272} = 0.739 \leq 1$$

■ Interaction moment – effort tranchant (interaction M-V)

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} = 0.914 > 0.5$$

⇒ L'interaction M-V doit être vérifiée



■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

■ Interaction moment – effort tranchant (interaction M-V)

$$\bar{\eta}_1 + \left[1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right] [2\bar{\eta}_3 - 1]^2 \leq 1 \text{ si } \bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

• Calcul du moment $M_{f,Rd}$:

Pour calculer $M_{f,Rd}$, il faut calculer la position de l'axe neutre plastique:

$$N_{abf} + N_{atf2} = 275.857 \text{ MN} \geq N_{atf1} + N_{su} + N_{sl} = 131.548 \text{ MN}$$

$$\text{et } N_{abf} = 181.357 \text{ MN} < N_{atf1} + N_{atf2} + N_{su} + N_{sl} = 210.928 \text{ MN}$$

⇒ ANP est situé dans la semelle supérieure n°2 à une distance z_{pl} du bas de la semelle inférieure:

$$z_{pl} = \frac{4(h - t_{tf.1})b_{tf.2}f_{yd}(t_{tf.2}) + N_{a.tf.1} + N_{su} + N_{sl} - N_{a.bf} - N_{a.tf.2}}{4b_{tf.2}f_{yd}(t_{tf.2})} = 3.827 \text{ m}$$



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 3. Vérification des sections transversales

□ 2. Appui intermédiaire P3 (moment négatif):

- Interaction moment – effort tranchant (interaction M-V)

$$\begin{aligned} M_{f,Rd} &= N_{su}(h + t_{slab} - c_{ur} - z_{pl}) + N_{sl}(h + c_{lr} - z_{pl}) \\ &+ \frac{(h - t_{tf.1} - z_{pl})^2}{2} 2b_{tf.2} f_{yd}(t_{tf.2}) + \frac{(h - t_{tf.1} - t_{tf.2} - z_{pl})^2}{2} 2b_{tf.2} f_{yd}(t_{tf.2}) \\ &+ N_{a.tf.1} \left(h - \frac{t_{tf.1}}{2} - z_{pl} \right) + N_{a.bf} \left(z_{pl} - \frac{t_p}{2} \right) = 714.623 \text{ MNm} \end{aligned}$$

- $|M_{Ed}| = 709.513 \text{ MNm} \leq M_{f,Rd} = 714.623 \text{ MNm}$ donc selon **l'EN1993-1-5, 7.1(1)**, il n'y a pas d'interaction. Les semelles sont suffisantes pour résister au moment de flexion et l'âme entière peut donc résister au cisaillement.



Exemple de dimensionnement n°2:

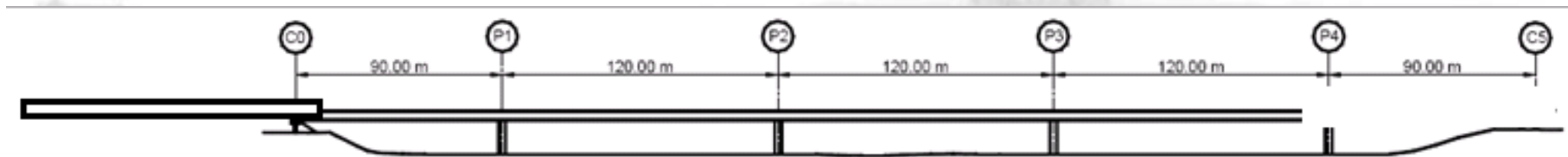
Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

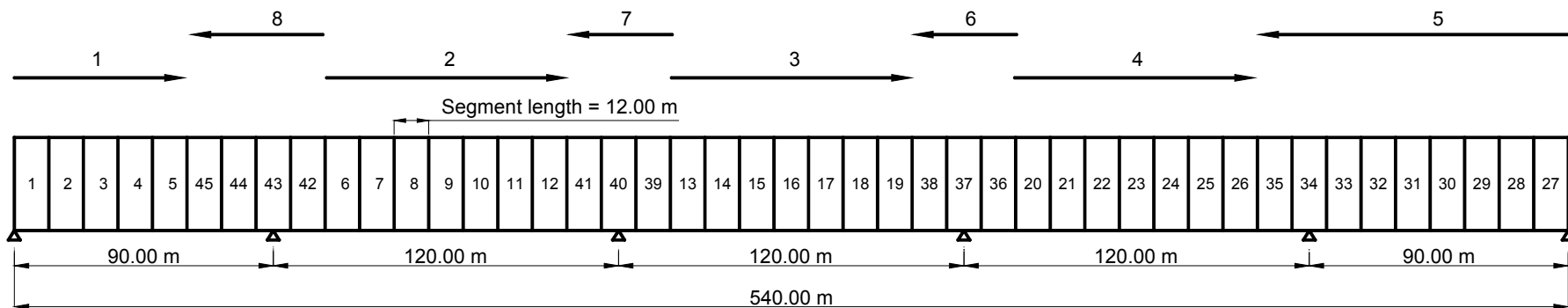
■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ Généralité

- 1. Lançage de la superstructure métallique du pont caisson



- 2. La dalle de béton est construite en place suivant cette ordre:





■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ Généralité

- Durant la construction, chaque section transversale doit être vérifiée à chaque étape de la construction. Mais ce n'est pas l'objet de cette étude.
- L'objet de cette étude est la vérification de la résistance au patch loading des poutres aciers durant le lançage.

□ Description du lançage

- Le pont est lancé seulement d'un coté (appui d'extrémité C0)
- Un avant-bec est utilisé pour réduire le déplacement vertical de la partie cantilever quand elle approche d'un appui
- L'avant-bec fait 28 m de long et son poids propre varie de 57 kN/m à la section connectée au caisson à 28 kN/m à son extrémité libre
- Un contreventement est ajouté entre les 2 semelles supérieurs pour le procédé de lançage.
- Sur les appuis, des patins de glissements d'une longueur de chargement de 3 m sont utilisés



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

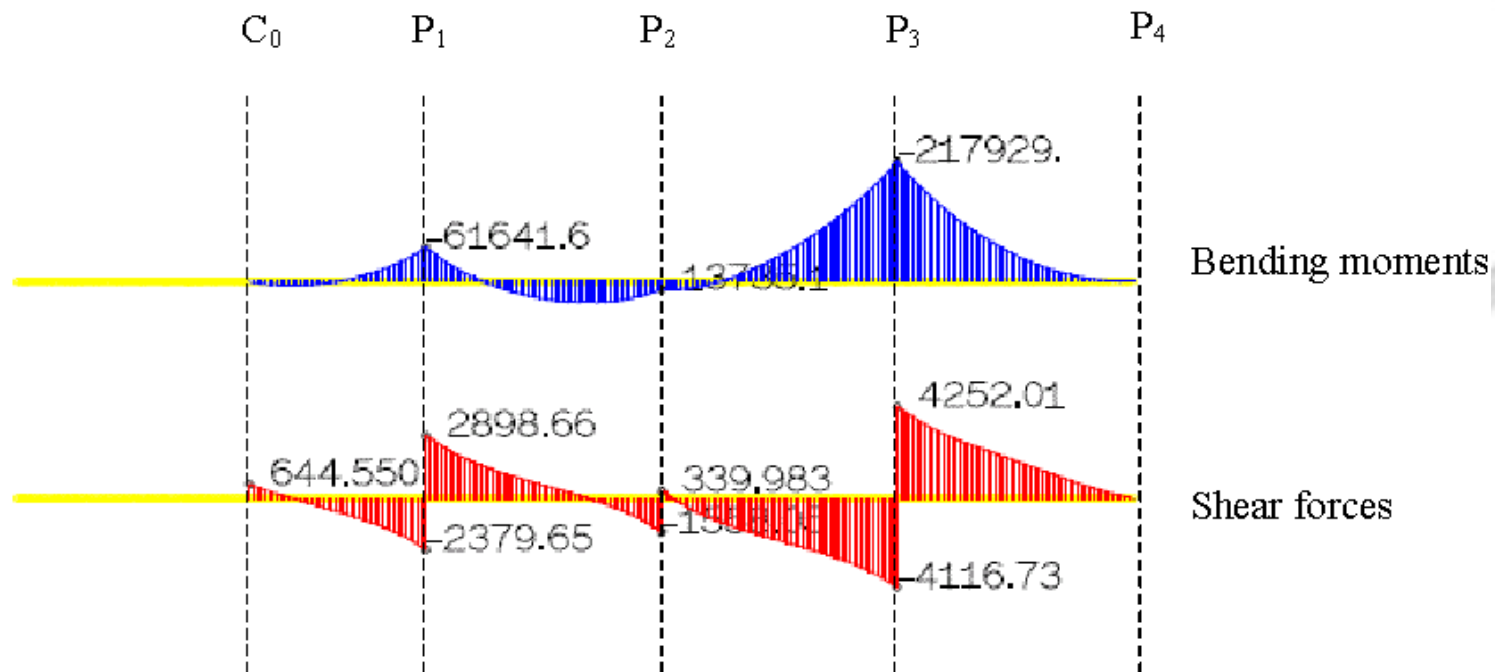
COMBRI+

■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ La détermination de la résistance au patch loading est faite selon:

- **La section 6 de EN1993-1-5**
- **La section 10 de EN1993-1-5**

□ Situation de lançage n°1 la plus défavorable pour le moment de flexion



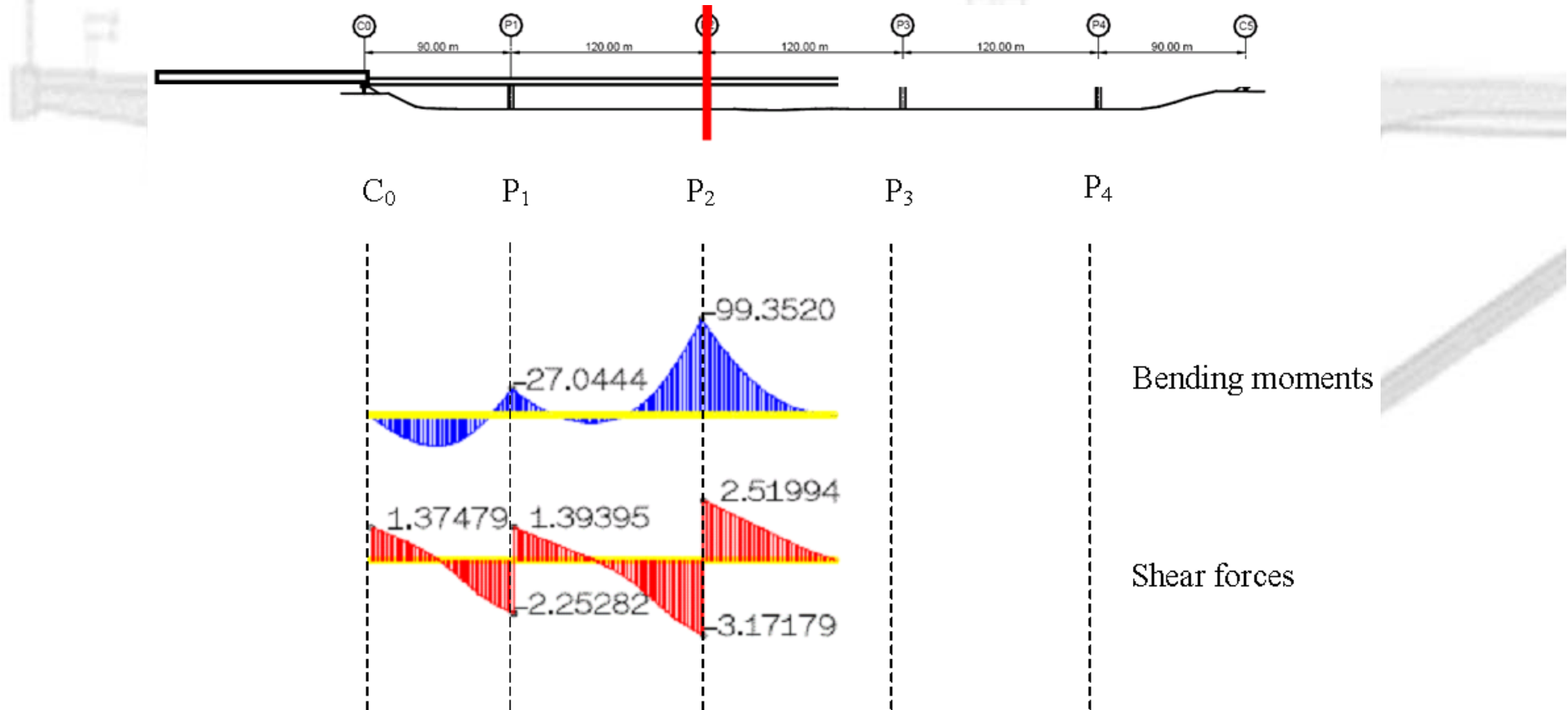


Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

- **4. Vérification des sections transversales durant le lançage**
 - Situation de lançage n°2 la plus défavorable pour la plus faible section transversale de fin de travée



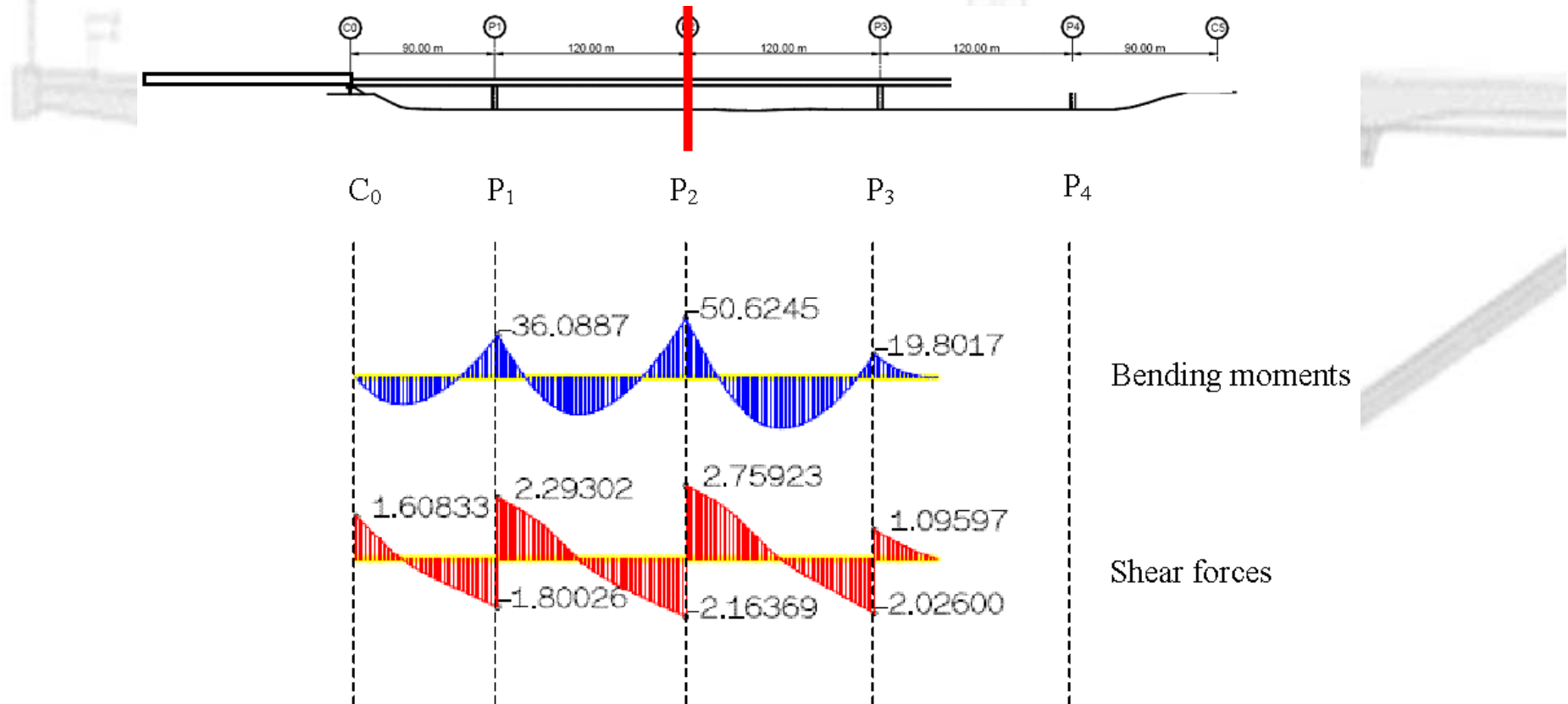


Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

- **4. Vérification des sections transversales durant le lançage**
 - Situation de lançage n°3 la plus défavorable pour la plus faible section transversale à mi-travée





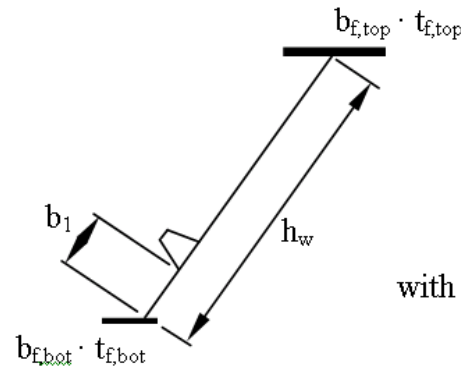
Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 4. Vérification des sections transversales durant le lancement

- Dimensions du panneau étudié au niveau des sections transversales critiques:



with $I_{sl,1} = 154894 \text{ cm}^4$

		Launching situation		
		“1”	“2”	“3”
$b_{f,top}$	[mm]	1500	1500	1500
$t_{f,top}$	[mm]	184	70	50
h_w	[mm]	4539.4	4726.2	4762.6
t_w	[mm]	27	20	18
$b_{f,bot}$	[mm]	1015.3	527.1	405.1
$t_{f,bot}$	[mm]	75	35	25
b_1	[mm]	657.9	695.2	702.5



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

- Forces internes de dimensionnement venant de l'analyse globale utilisées lors de la vérification selon **la section 6 de EN1993-1-5**:

		Launching situation		
		"1"	"2"	"3"
M_{Ed}	[MNm]	-217.93	-99.35	-50.62
$V_{Ed,max}$	[MN]	4.25	3.17	2.16
$V_{Ed,applied} = V_{Ed,max} - F_{Ed}/2$	[MN]	-0.83	-0.29	-0.83
F_{Ed}	[MN]	8.37	5.69	4.92
$F_{Ed,web}$	[MN]	10.15	6.91	5.97
$F_{Ed,bottom\ plate}$	[MN]	5.75	3.91	3.38

- Le moment de flexion négatif a une influence sur la résistance au patch loading pour la situation de lançage n°1 seulement. Dans tous les cas, l'effort tranchant additionnel est presque négligeable \Rightarrow seul les calculs pour la situation 1 sont présentés en détail



■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 1. Vérification selon la section 6 de EN1993-1-5

- Détermination de la charge critique F_{cr} :

$$\gamma_s = 10.9 \frac{I_{sl.1}}{h_w t_w^3} = 188.96$$

$$\gamma_{s.min} = 13 \left(\frac{a}{h_w} \right)^3 + 210 \left(0.3 - \frac{b_1}{a} \right) = 37.36$$

$$\gamma_s > \gamma_{s.min} \Rightarrow \gamma_s = 13 \left(\frac{a}{h_w} \right)^3 + 210 \left(0.3 - \frac{b_1}{a} \right) = 37.36$$

$$k_F = 6 + 2 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + \left(5.44 \frac{b_1}{a} - 0.21 \right) \sqrt{\gamma_s} = 12.76$$

$$F_{cr} = 0.9 k_F \cdot E_a \frac{t_w^3}{h_w} = 10.46 \text{ MN}$$



■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 1. Vérification selon **la section 6 de EN1993-1-5**

- Détermination du champ de charge F_y :

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} = 35.42$$

$$m_2 = 0.02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 = 73.26$$

$$l_y = \min \left(s_s + 2t_f (1 + \sqrt{m_1 + m_2}); a \right) = 4000 \text{ mm}$$

$$F_y = l_y t_w f_{yw} = 37.26 \text{ MN}$$

- Détermination du paramètre d'élançement λ_F :

$$\lambda_F = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = 1.89$$

$\lambda_F \geq 0.5$ est une précondition pour utiliser la formule donnant m_2

si $\lambda_F \leq 0.5$, $m_2 = 0$ selon **le paragraphe 6.5(1), EN1993-1-5**



■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 1. Vérification selon la section 6 de EN1993-1-5

- Détermination du facteur de réduction χ_F :

$$\text{si } \lambda_F \leq 0.5 \Rightarrow \chi_F = 1$$

$$\text{si } \lambda_F \geq 0.5 \Rightarrow \chi_F = \frac{0.5}{\lambda_F} = 0.26$$

- Détermination de la résistance au patch loading:

$$L_{eff} = \chi_F l_y = 1059.6 \text{ mm} \Rightarrow F_{Rd} = \frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}} = 8.97 \text{ MN}$$

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed.web}}{F_{Rd}} = 1.132 > 1$$

La résistance au patch loading n'est pas vérifiée et donc les cas d'interaction ne le seront pas non plus



■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 1. Vérification selon **la section 6 de EN1993-1-5**

- Interaction entre la force transversale et le moment de flexion

$$\sigma_{x.Ed} = \frac{M_{Ed}}{W_{bot}} = 189.42 \text{ MPa} \Rightarrow \eta_1 = \frac{\sigma_{x.Ed}}{f_{yf}} = 0.58 > 0.5$$

γ_{M0}

⇒ l'interaction avec le moment de flexion doit être considérée

W_{tot} prends en compte l'effet de voilement de plaque dans la semelle inférieure et dans les âmes

Cependant, suivant **la section 7 de EN1993-1-5**:

$$\eta_1 + 0.8 \cdot \eta_2 \leq 1.4 \text{ ici } \eta_1 = 0.58 \text{ et } \eta_2 = 1.132, \text{ la vérification de l'interaction devient:}$$
$$0.58 + 0.8 \cdot 1.132 = 1.6 > 1.4$$

- Interaction entre la force transversale et le l'effort tranchant

Bien que le panneau considéré est soumis à un effort tranchant additionnel $V_{Ed} = 0.83$ MN qui n'est pas induit par le patch loading, cette interaction n'est pas pris en compte dans l'**EN1993-1-5**



■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 1. Vérification selon la section 6 de EN1993-1-5

■ Résultats de la situation de lançage n°2

$$F_{cr} = 4.19 \text{ MN} \quad F_Y = 4.19 \text{ MN} \quad F_{Rd} = 4.89 \text{ MN}$$

$$\eta_1 = 0.456 \leq 0.5 \quad \eta_2 = 1.413$$

- L'interaction avec le moment de flexion n'a pas à être considérée

■ Résultats de la situation de lançage n°3

$$F_{cr} = 3.05 \text{ MN} \quad F_Y = 24.84 \text{ MN} \quad F_{Rd} = 3.96 \text{ MN}$$

$$\eta_1 = 0.294 \leq 0.5 \quad \eta_2 = 1.510$$

- L'interaction avec le moment de flexion n'a pas à être considérée



Exemple de dimensionnement n°2:

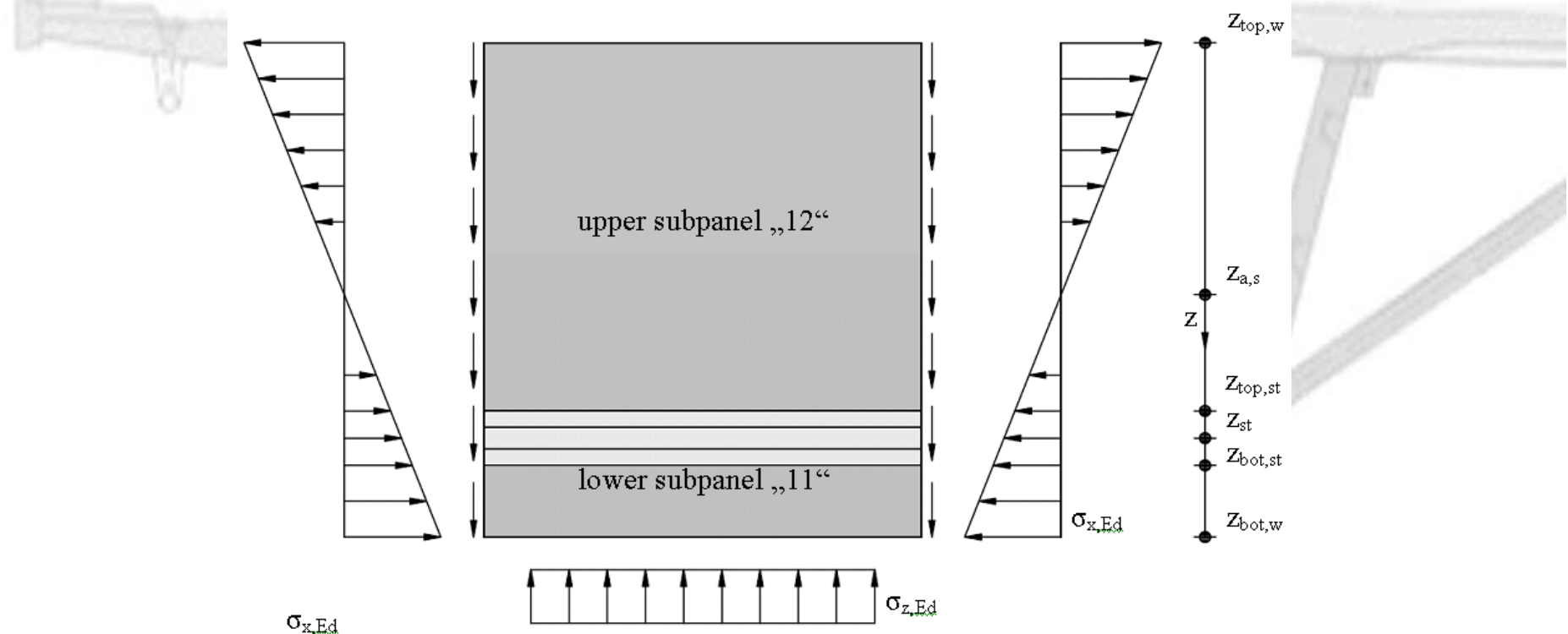
Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

- Champ de contraintes résultant agissant sur le panneau étudié et utilisé lors de la vérification selon **la section 10 de EN1993-1-5**:

- Situation de lançage n°1: vérification du panneau d'âme





Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

- Champ de contraintes résultant agissant sur le panneau étudié et utilisé lors de la vérification selon **la section 10 de EN1993-1-5**:

- Situation de lançage n°1: vérification du panneau d'âme

$$I_a = 4.524 \cdot 10^8 \text{ cm}^4$$

- Le trainage de cisaillement ne doit pas être considéré car, selon l'**EN1993-1-5, section 3.1** :

$$b_p = 6.5 \text{ m} \quad L_3 = 92 \text{ m} \quad L_e = 2L_3 = 184 \text{ m}$$

$$b_0 = \frac{b_p}{2} = 3.25 \text{ m} \leq \frac{L_e}{50} = 3.68 \text{ m}$$

Position [Index]	z-axis [mm]	W [cm ³]	$\sigma_{x,Ed}$ [MPa]	$\sigma_{z,Ed}$ [MPa]
“top,w”	-1906.3	-1186573	-183.7	0.0
“top,st”	880.5	2569047	84.8	72.9
“st”	1086.5	2081882	104.7	81.7
“bot,st”	1292.5	1750027	124.5	87.7
“bot,w”	1834.7	1232880	176.8	98.4



■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

- Champ de contraintes résultant agissant sur le panneau étudié et utilisé lors de la vérification selon **la section 10 de EN1993-1-5**:

- Situation de lançage n°1: vérification du panneau d'âme

- Dimensions

- Largeurs de sous-panneau:

$$b_{11} = b_1 = 657.9 \text{ mm}$$

$$b_{12} = 3381.5 \text{ mm}$$

- Largeurs de sous-panneau par rapport à la ligne central du raidisseur:

$$b_{11,st} = 907.9 \text{ mm}$$

$$b_{12,st} = 3631.5 \text{ mm}$$

- La valeur de la contrainte additionnelle de cisaillement vaut $\tau_{Ed} = 0.6 \text{ MPa}$

- La distribution de contrainte:

$$\psi_{ov} = -1.04$$

$$\psi_{11} = 0.70$$

$$\psi_{12} = -2.17$$



■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 2. Vérification selon **la section 10 de EN1993-1-5**

■ Vérification du sous-panneau "11" ($\alpha_{11} = 6.1$)

□ Détermination du coefficient d'amplification minimum de charge $\alpha_{cr.x.11}$

- Pour chaque composante du champ de contraintes (calcul à la main)

$$\sigma_E = 189800 \text{ MPa} \left(\frac{t_w}{h_w} \right)^2 = 319.7 \text{ MPa}$$

- La contrainte critique longitudinale élastique selon **la table 4.1 de la section 4.4 de l'EN 1993-1-5**

$$\psi_{11} = 0.70 \Rightarrow k_{\sigma.x} = \frac{8.2}{1.05 + \psi_{11}} = 4.674$$

$$\sigma_{cr.x.11} = k_{\sigma.x.11} \sigma_{E.11} = 1494.2 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{cr.x.11} = \frac{\sigma_{cr.x.11}}{\sigma_{x.Ed.bot.w}} = 8.453$$



■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 2. Vérification selon **la section 10 de EN1993-1-5**

■ Vérification du sous-panneau "11" ($\alpha_{11} = 6.1$)

□ La contrainte critique transversale élastique selon **la table 8.12**

A cause du rapport d'aspect important ($\alpha_{11} = 6.1$), la détermination de la contrainte critique transversale élastique n'est pas calculable à la main

⇒ utilisation du logiciel **EBPlate**:

$$\sigma_{cr.z.11} = 360.7 \text{ MPa} \Rightarrow \alpha_{cr.z} = \frac{\sigma_{cr.z.11}}{\sigma_{z.Ed}} = 3.67$$

□ La contrainte critique élastique de cisaillement selon **l'équation (A.5), Annexe A.3, EN 1993-1-5**

$$\frac{a}{b_{11}} = \frac{2500}{657.9} = 3.8 \geq 1 \Rightarrow k_{\tau} = 5.34 + 4.00 \left(\frac{b_{11}}{a} \right)^2 = 5.448$$

$$\tau_{cr.11} = k_{\tau.11} \sigma_{E.11} = 1741.8 \text{ MPa}$$



■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 2. Vérification selon **la section 10 de EN1993-1-5**

■ Détermination du coefficient d'amplification minimum de charge α_{cr}

- Contrainte critique élastique de cisaillement selon **l'équation (A.5), Annexe A.3, EN 1993-1-5**

$$\alpha_{cr.\tau.11} = \frac{\tau_{cr.11}}{\tau_{Ed}} = 3162.6$$

- Facteur d'amplification de charge minimum selon **l'équation (10.6), Section 10, EN 1993-1-5**

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{\frac{1+\psi_{11}}{4\alpha_{cr.x.11}} + \frac{1}{2\alpha_{cr.z.11}} + \sqrt{\left(\frac{1+\psi_{11}}{4\alpha_{cr.x.11}} + \frac{1}{2\alpha_{cr.z.11}}\right)^2 + \frac{1-\psi_{11}}{2\alpha_{cr.x.11}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr.\tau.11}^2}}} = 2.638$$



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 2. Vérification selon la section 10 de EN1993-1-5

- Détermination du coefficient d'amplification minimum de charge α_{cr}
 - Pour le champ de contrainte complet (en utilisant un programme approprié)
 - Dans le cas où le logiciel **EBPlate** est utilisé, le facteur d'amplification minimum peut être déterminé en une seule fois: $\alpha_{cr} = 3.490$
 - Dans les calculs suivant, la valeur $\alpha_{cr} = 2.638$ est utilisée
- Détermination de $\alpha_{ult.k}$:

$$\sigma_{eq.11} = \sqrt{\sigma_{x.Ed.bot.w}^2 + \sigma_{z.Ed}^2 - \sigma_{x.Ed.bot.w} \cdot \sigma_{z.Ed} + 3\tau_{Ed}^2} = 153.4 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{ult.k.11} = \frac{f_{yw}}{\sigma_{eq}} = 2.249$$



■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 2. Vérification selon **la section 10 de EN1993-1-5**

- Détermination du paramètre d'élançement $\bar{\lambda}_p$

$$\bar{\lambda}_{p.11} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult.k.11}}{\alpha_{cr.11}}} = 0.923$$

- Détermination des facteurs de réduction ρ :

- En utilisant différentes courbes de voilement:

- Contrainte longitudinal selon **l'équation (4.2), section 4.4, EN 1993-1-5:**

$$\rho_{x.11} = \frac{\bar{\lambda}_{p.11} - 0.055(3 + \psi_{11})}{\bar{\lambda}_{p.11}^2} = 0.844$$

La vérification du comportement de voilement colonne dans la direction longitudinal pour les plaques devrait être vérifié selon **la section 4.4(6), EN1993-1-5**, pour les plaques ayant un rapport d'aspect $a < 0.15$. Ce comportement colonne n'est pas calculé en détail.



■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 2. Vérification selon **la section 10 de EN1993-1-5**

■ Détermination des facteurs de réduction ρ_z :

□ En utilisant différentes courbes de voilement:

• Contrainte transversale selon **l'annexe B.1, EN1993-1-5**:

$$\rho_z = \frac{1}{\phi_{p..} + \sqrt{\phi_{p..}^2 - \bar{\lambda}_{p11}}} = 0.842 \text{ avec } \phi_{p..} = 0.983$$

A cause de la distribution non-linéaire des contraintes transversales dans l'âme, la détermination de la contrainte critique de voilement en colonne a été faite plus rigoureusement selon une méthode énergétique qui prend en compte cette distribution non-linéaire des contraintes.

$$\sigma_{cr.c.11} = 333.2 \text{ MPa} \Rightarrow \frac{\sigma_{cr.z.11}}{\sigma_{cr.c.11}} = 1.08 \Rightarrow \xi = \frac{\sigma_{cr.z.11}}{\sigma_{cr.c.11}} - 1 = 0.08$$

ici ξ est proche de 0, Le comportement colonne doit être considéré selon la définition de **la section 4.5.4, EN1993-1-5**



■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 2. Vérification selon **la section 10 de EN1993-1-5**

■ Détermination des facteurs de réduction ρ :

□ En utilisant différentes courbes de voilement:

- Contrainte de cisaillement selon la **table 5.1, EN1993-1-5** avec $\eta = 1.2$:

$$\bar{\lambda}_{c.11} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\sigma_{cr.c1.11}}} = 1.051$$

$$\Rightarrow \chi_{c.11} = \frac{1}{\phi_{11} + \sqrt{\phi_{11}^2 - \lambda_{c.11}^2}} = 0.630$$

$$\rho_{c.z.11} = (\rho_{c.11} - \chi_{c.11}) \xi_{11} (2 - \xi_{11}) + \chi_{c.11} = 0.663$$

$$\text{si } \lambda_{p.11} < 0.83 \Rightarrow \chi_{w.11} = 1$$

$$\text{si } \lambda_{p.11} \geq 0.83 \Rightarrow \chi_{w.11} = \frac{0.83}{\lambda_{p.11}} = 0.899$$



■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 2. Vérification selon **la section 10 de EN1993-1-5**

■ Détermination des facteurs de réduction ρ :

□ En utilisant un seul coefficient de voilement:

• Selon la **Table B.1 de Annex B de l'EN1993-1-5**

$$\bar{\lambda}_{p0} = 0.80 \text{ et } \alpha_p = 0.34$$

$$\Rightarrow \phi_{p.11} = 0.5 \left[1 + \alpha_p (\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p0}) + \bar{\lambda}_p \right] = 0.983$$

$$\rho_{11} = \frac{1}{\phi_{p.11} + \sqrt{\phi_{p.11}^2 - \bar{\lambda}_{p.11}}} = 0.842$$

$$\rho_{c.11} = \chi_{c.11} + (\rho_{11} - \chi_{c.11}) \cdot f_{11} = 0.651$$



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ 2. Vérification selon **la section 10 de EN1993-1-5**

■ Détermination de la résistance au patch loading:

□ En utilisant différentes courbes de voilement:

$$\eta_{diff.11} = \sqrt{\left(\frac{\frac{\sigma_{x.Ed.bot} \cdot W}{\rho_{x.11}}}{\frac{f_{yw}}{\gamma_{M1}}} \right)^2 + \left(\frac{\frac{\sigma_{z.Ed}}{\rho_{c.z.11}}}{\frac{f_{yw}}{\gamma_{M1}}} \right)^2 - \left(\frac{\frac{\sigma_{x.Ed.bot.w}}{\rho_{x.11}}}{\frac{f_{yw}}{\gamma_{M1}}} \right) \left(\frac{\frac{\sigma_{z.Ed}}{\rho_{c.z.11}}}{\frac{f_{yw}}{\gamma_{M1}}} \right) + 3 \left(\frac{\frac{\tau_{Ed}}{\chi_{w.11}}}{\frac{f_{yw}}{\gamma_{M1}}} \right)^2} = 0.595$$

□ En utilisant une seule courbe de voilement:

• Selon la **Table B.1, Annex B, EN1993-1-5**

$$\alpha_{Rd.11} = \frac{\rho_{c.11} \alpha_{ult.k.11}}{\gamma_{M1}} = 1.332 \Rightarrow \eta_{single} = \frac{1}{\alpha_{Rd.11}} = 0.751$$

Les mêmes calculs sont réalisés pour le sous-panneau "22"



Exemple de dimensionnement n°2:

Pont caisson mixte en acier-béton

COMBRI+

■ 4. Vérification des sections transversales durant le lançage

□ Résultats

- La distribution de résistance au patch loading selon l'**EN1993-1-5** sur toute la longueur du pont:

