



COMBRI⁺

Valorisation des connaissances en vue d'une amélioration de la compétitivité des ponts mixtes et en acier

Réflexions générales sur la conception des ponts métalliques et mixtes acier-béton



Universität Stuttgart
Germany





Le contexte

Utilisation et valorisation des avancées de l'EN 1993-1-5 pour le design des ponts métalliques et mixtes

→ "COMBRI Design Manual part II – State-of-the-Art and Conceptual Design of Steel and Composite Bridges" (*bientôt disponible en français et en allemand*)

CONTENU

- Etat de l'art en Région Wallonne et dans les pays voisins (France, Allemagne) + informations sur quelques exemples récents en Espagne et en Suède
- Discussions et réflexions sur la conception des ponts mixtes
 - Nuances d'acier
 - Conception des semelles et des âmes
 - Entretoises et diaphragmes
 - Mise en place par lançage

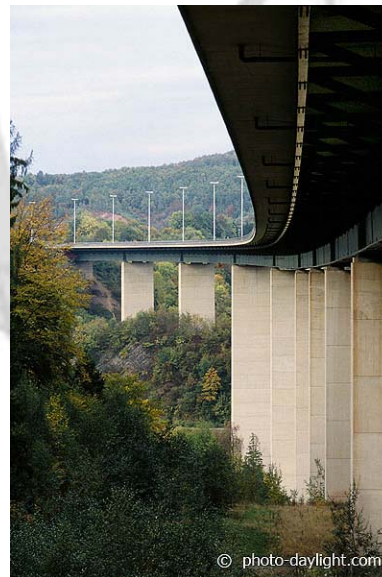


ETAT DE L'ART

- Ponts "purs métallique" assez rares (ponts suspendus, haubanés ou mobiles)
 - Accent sur les ponts mixtes

Quelques généralités introductives

- Configuration la plus économique = bi-poutres





ETAT DE L'ART

- Ponts "purs métallique" assez rares (ponts suspendus, haubanés ou mobiles)
 - Accent sur les ponts mixtes

Quelques généralités introductives

- Configuration la plus économique = bi-poutres
- Problème potentiel de sécurité (cf. situation US)
 - poutres multiples (mais beaucoup moins économique !!) – Encombrement réduit



Hafenbahn Brücke, Duisburg
N. Janberg (Structurae.de)



ETAT DE L'ART

- Ponts "purs métallique" assez rares (ponts suspendus, haubanés ou mobiles)
 - Accent sur les ponts mixtes

Quelques généralités introductives

- Configuration la plus économique = bi-poutres
- Problème potentiel de sécurité (cf. situation US) → poutres multiples (mais beaucoup moins économique !!)
- Situation classique: $L/h = 20$ à 30
 - 20: travées intérieures d'ouvrages continus
 - 30: travées isostatiques → Intérêt de réduire les travées d'extrémités (0.6 à 0.85 L)



- **Tablier béton:**

- Béton armé jusque 13m de large
- Béton précontraint au-delà de 13m
- Solutions alternatives:
 - Réduction de la portée transversale par le positionnement d'une poutre intermédiaire supportée par l'entretoisement
 - Comportement mixte transversal





• Ponts caissons:

- Avantage: raideur importante en torsion → ponts courbes
- Meilleure reprise des chargements excentrés
- Coûts de fabrication plus élevés
- Possibilité de cellules multiples pour réduction de la portée transversale, pas forcément la meilleure solution point de vue économique
- Sensibilité à la distorsion → diaphragmes ou cadres transversaux



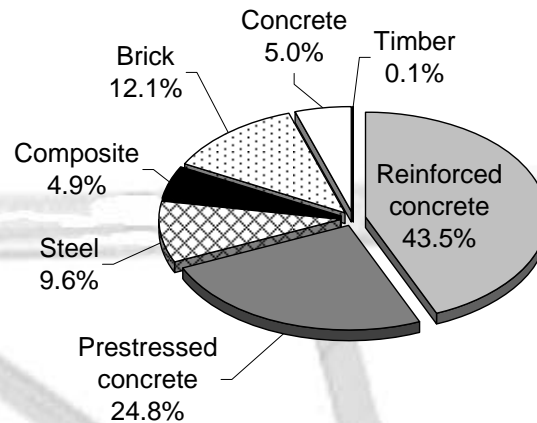


La place des ponts métalliques et mixtes

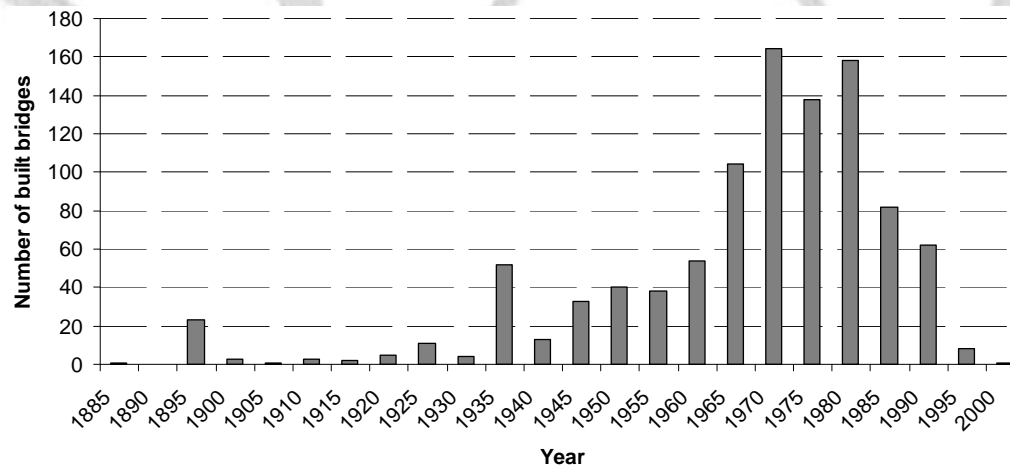
Région Wallonne

(Ponts routiers)

Sur 3250 ponts
(chiffres MET 2002)



Années de mise en service

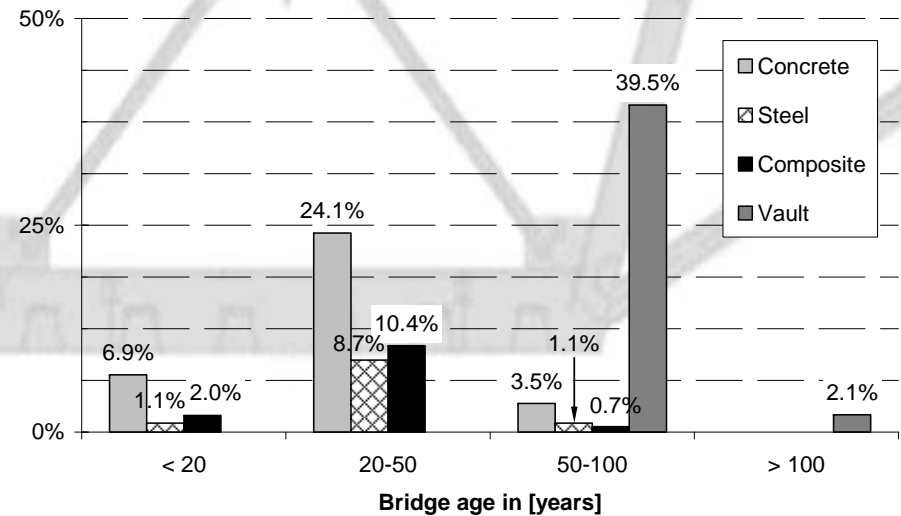
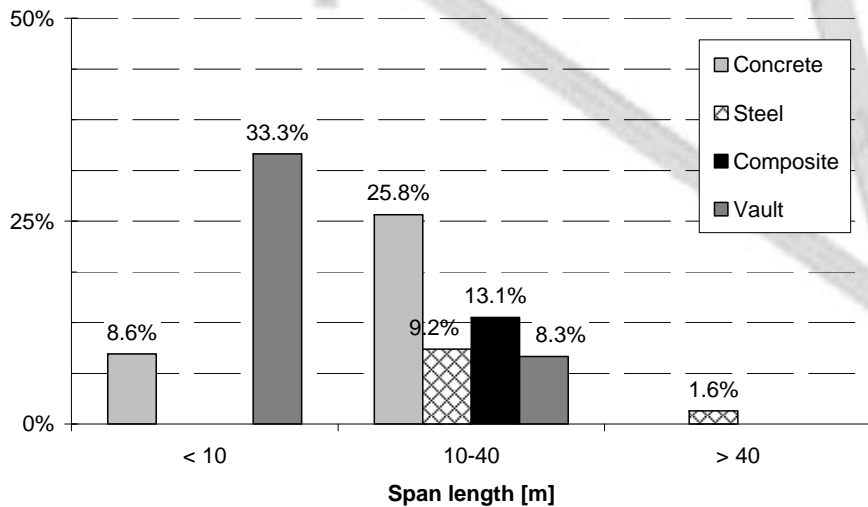
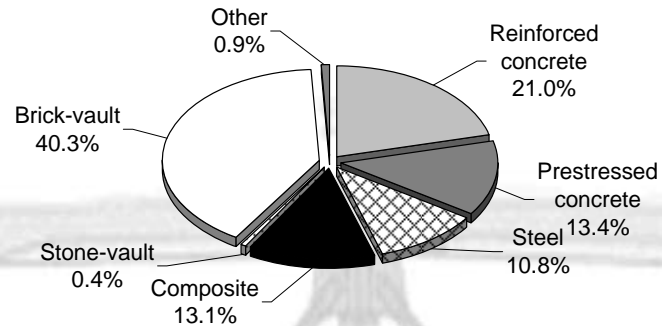




La place des ponts métalliques et mixtes

Belgique (Ponts ferroviaires)

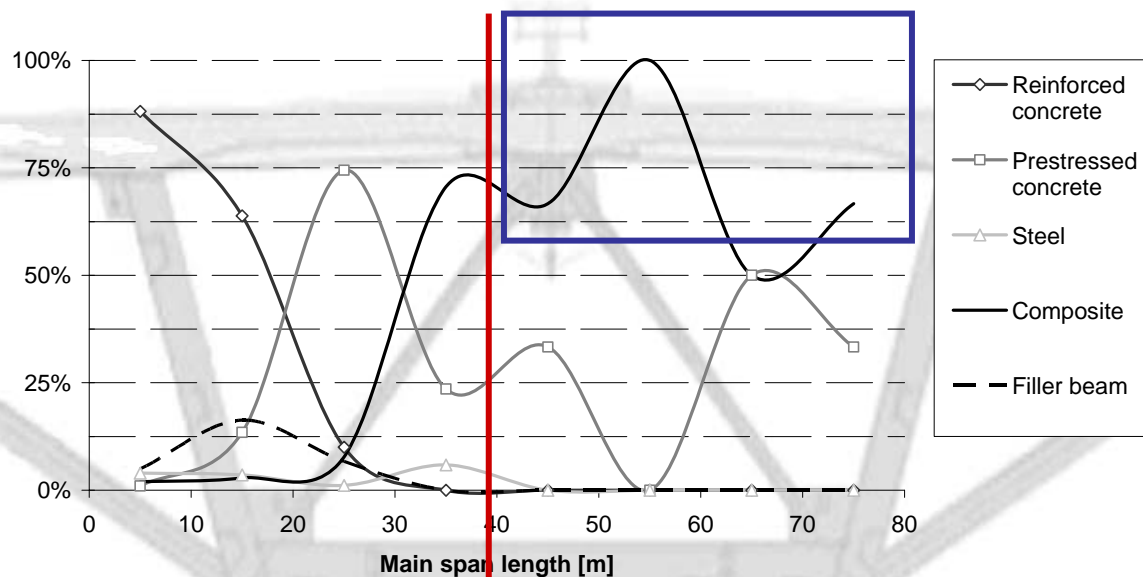
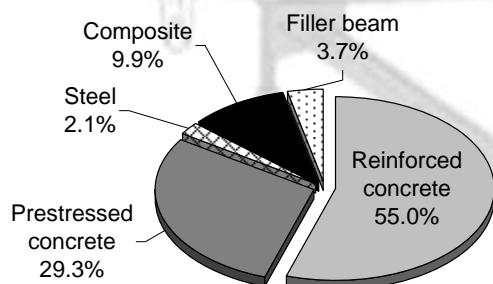
Sur 5206 ouvrages (Chiffres SNCB)





La place des ponts métalliques et mixtes

Nouveaux ouvrages routiers en **France** en 2004 (282)



"Petits" ponts

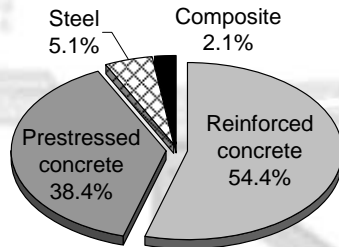
"Grands" ponts (10 à 15%)



La place des ponts métalliques et mixtes

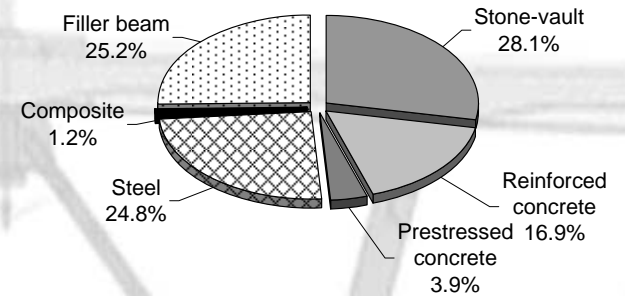
Situation en Allemagne

Toutes longueurs

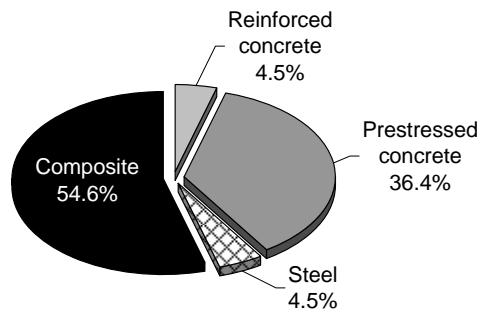


Autoroutes fédérales

Chemin de fer

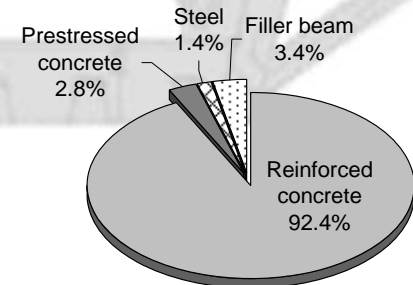


Grands ponts



Autoroutes fédérales

Chemin de fer

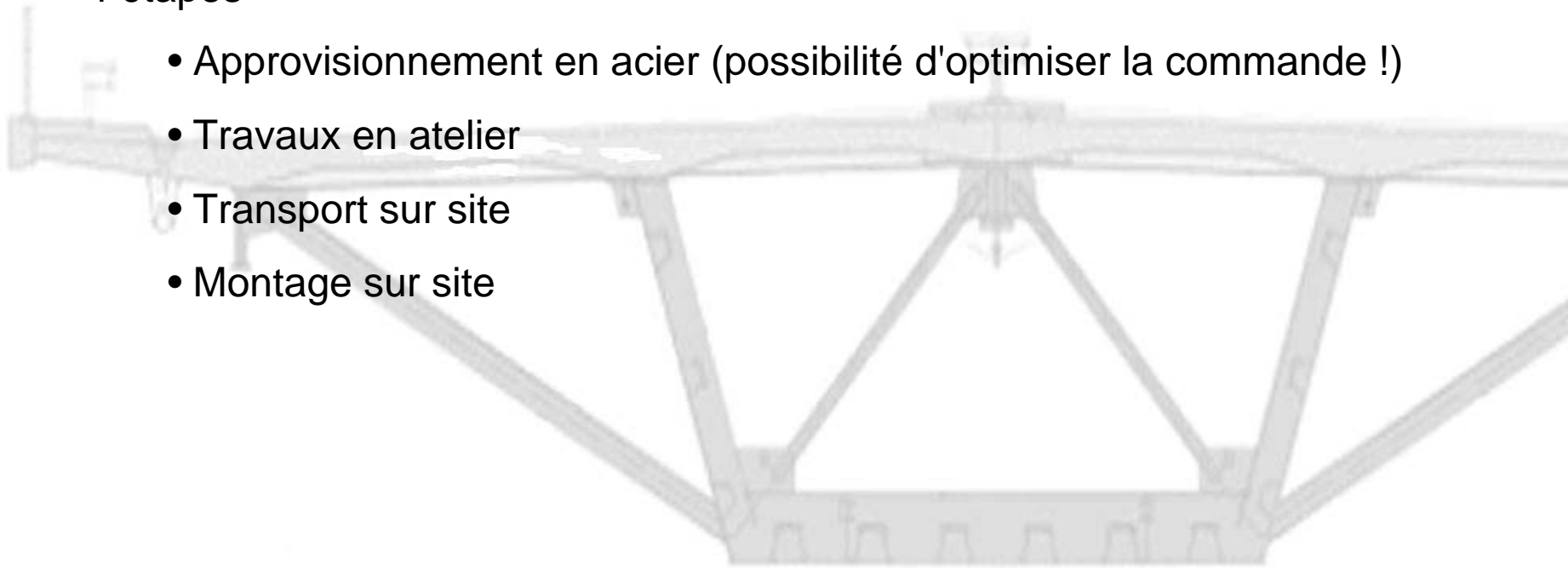




Aspects économiques

4 étapes

- Approvisionnement en acier (possibilité d'optimiser la commande !)
- Travaux en atelier
- Transport sur site
- Montage sur site





Aspects économiques

4 étapes

- Approvisionnement en acier (possibilité d'optimiser la commande !)
- **Travaux en atelier**
- Transport sur site
- Montage sur site

Quelques chiffres indicatifs pour un bi-poutre classique

(Données SETRA)



| Etapes | Durée | Poids |
|---------------------------------|-------|-------|
| Fabrication des poutres | | |
| • Découpage | 10 % | |
| • Raboutage | 11 % | |
| • Assemblage de la poutre | 14 % | 85 % |
| • Raidissage | 48 % | 6 % |
| • Goujons | 4 % | |
| • Expédition | 5 % | |
| Fabrication de l'entretoisement | 5 % | 6 % |
| Divers | 3 % | 3 % |



Pistes de réflexions sur les choix de conceptions

- En relation avec les pratiques nationales voisines (surtout France, Allemagne... et Suède)
- Basées sur l'application des règles de EN 1993-1-5
- Justifiées par des estimations de coûts (quand c'est possible !)
- Différents aspects considérés:
 - Choix des nuances d'acier
 - Conception des semelles
 - Conception des âmes
 - Conception de l'entretoisement
 - Mise en place par lançage



Choix des nuances d'acier

- Le plus utilisé en Europe dans le domaine des ponts **S355**
 - S460 courant en France pour les ponts routiers (moins en Allemagne)
 - Limitation de l'utilisation du S460 pour les ponts mixtes (réduction jusqu'à 85 % de la résistance plastique)
- Réflexions sur l'intérêt d'utiliser des aciers à haute limite élastique (S460, voire S690)

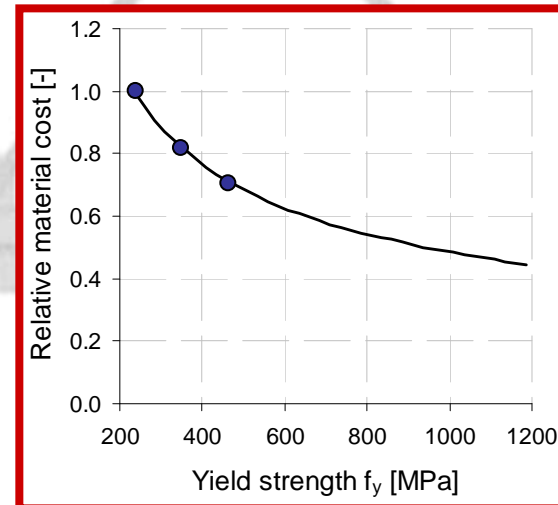
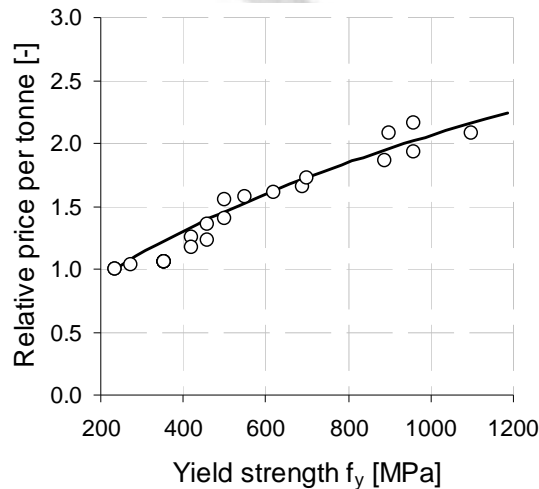


Choix des nuances d'acier

Estimation chiffrée de la part du coût du matériau si la résistance est complètement utilisée

4 étapes

- **Approvisionnement en acier**
- Travaux en atelier
- Transport sur site
- Montage sur site





Choix des nuances d'acier

Limitations possibles à une "non utilisation" de la résistance

- Critères en déformation (de toute évidence pas objectifs !)

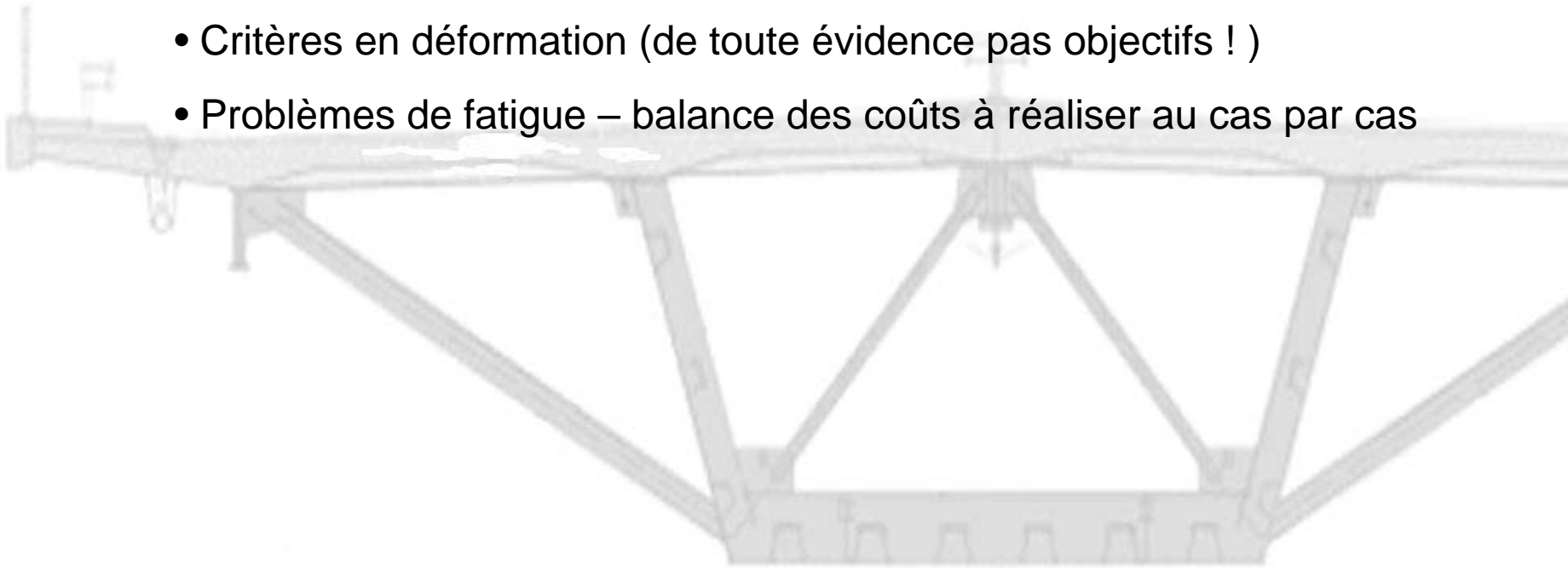
| Country | Road bridges | | Railway bridges | | Hybrid girders |
|---------|--|------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|
| | Highest steel grade | Deflection limit | Highest steel grade | Deflection limit | |
| Belgium | S355 to S460 | L/700 | S355 | L/900 | allowed but not used |
| France | S460 | n.a. | S355 | EN 1991-2, EN 1990/A1 | no |
| Germany | S355 (higher steel grades only with a "ZiE"*) | n.a. | S355 | L/600 to L/800 | allowed but not used |
| Spain | S460 | L/600 to L/4000 | n.a. | L/600 to L/900 | no |
| Sweden | S460 to S690 | L/400 | S355 to S420 | L/800 | yes |



Choix des nuances d'acier

Limitations possibles à une "non utilisation" de la résistance

- Critères en déformation (de toute évidence pas objectifs !)
- Problèmes de fatigue – balance des coûts à réaliser au cas par cas

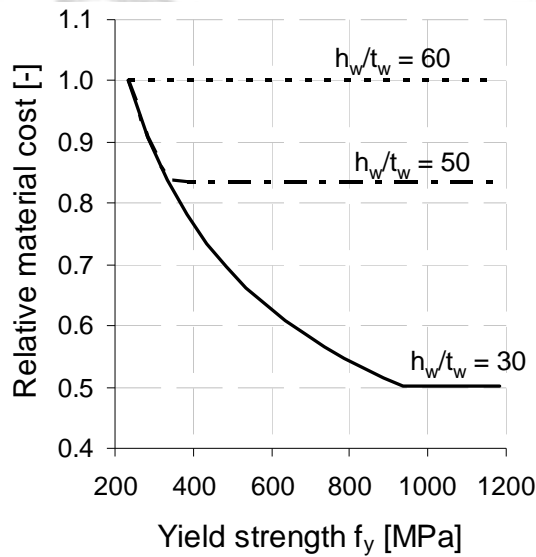




Choix des nuances d'acier

Limitations possibles à une "non utilisation" de la résistance

- Critères en déformation (de toute évidence pas objectifs !)
- Problèmes de fatigue – balance des coûts à réaliser au cas par cas
- Problèmes de stabilité (en particulier pour les âmes)



Envisager des solutions de poutres hybrides (autorisées par EC3-EC4)



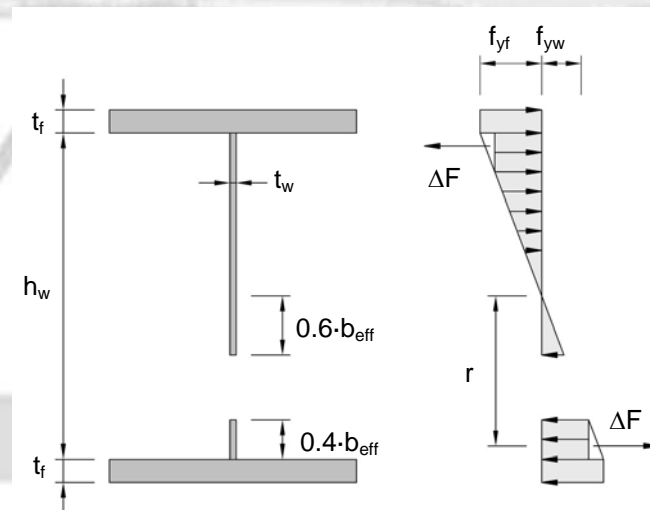
Choix des nuances d'acier

Poutres hybrides – 2 exemples développés dans la recherche COMBRI

Bi-poutres

Âme S355 → S460

| Item | Amount | Unit | Cost/Unit [SEK] | Cost [SEK] |
|-------------|---------|------|-----------------|-------------|
| S460 | - 5,376 | kg | 11.5 | - 61,824.- |
| S355 | 5,866 | kg | 9.4 | - 55,148.- |
| Splice | 1.0 | h | 450.0 | 0,0450.- |
| Total [SEK] | | | | 0 - 6,226.- |
| Total [€] | | | | - 685.- |



—————> Réduction de 9 Eur/m² de tablier

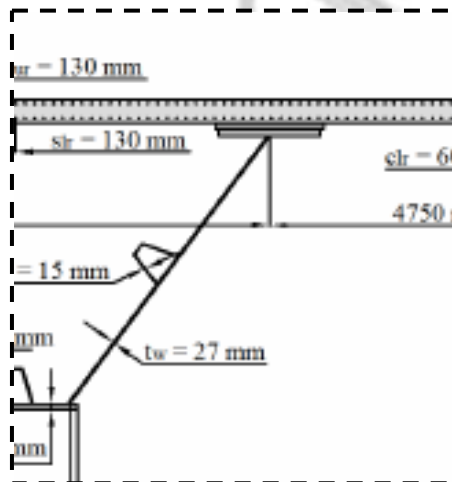


Choix des nuances d'acier

Poutres hybrides – 2 exemples développés dans la recherche COMBRI

Caisson

Tout S355 → Tout S460 + semelles semelle supérieure S690 aux appuis



| Box-girder | Whole | Upper flanges | Bottom flange | Webs |
|------------|-------------|---------------|---------------|-----------|
| S355 | 2,520,000 € | 921,000 € | 943,000 € | 656,000 € |
| S460/S690 | 2,020,000 € | 518,000 € | 749,000 € | 756,000 € |
| Difference | - 20% | - 44% | - 21% | + 15% |



Conception des semelles

Bi-poutres

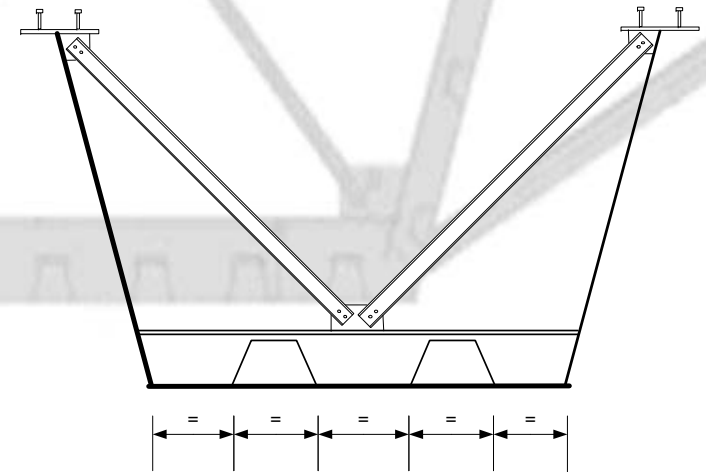
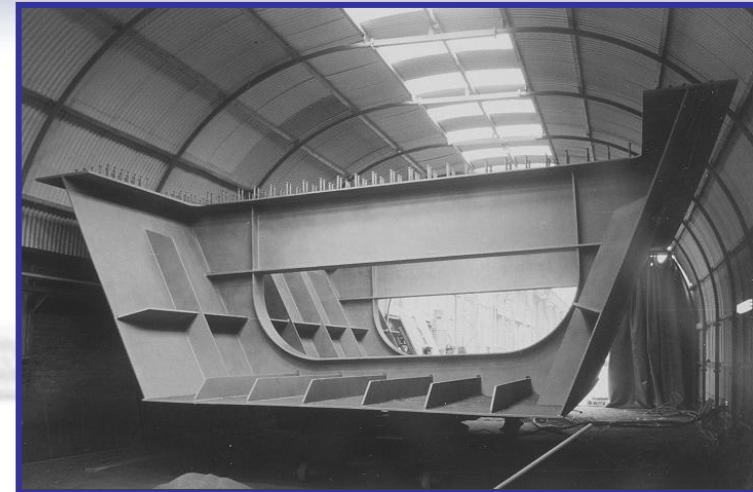
- Généralement semelles en classe 3 (ou moins)
- Pour la vérification au déversement, ajuster la position des entretoises plutôt que les dimensions de semelles
- Problème des pigeons et autres volatiles...



Conception des semelles

Caissons

- En général, nécessité de raidir la semelle inférieure
- Raidisseurs ouverts (minimum classe 3) ou fermés (peuvent passer en classe 4)
- Utilité d'un calcul numérique
- En particulier, possibilité de prendre en compte la raideur en torsion pour les raidisseurs fermés
- Raideur minimale à assurer
- Envisager l'utilisation d'un petit nombre de raidisseurs de grande dimension





Conception des semelles

Double action mixte (semelles supérieure ET inférieure mixtes)

- Approche principalement allemande (quelques cas en France pour des ponts ferroviaires)
- Raisonnement de base: la semelle inférieure en compression autour des appuis n'est plus un tôle raidie, mais une dalle mixte (→ béton moins cher que raidissage)





Conception des semelles

Double action mixte (semelles supérieure ET inférieure mixtes)

MAIS

- Modification des raideurs de section → influence sur la distribution longitudinale des efforts
- Approche "Bernoulli" mise en défaut: distribution de contraintes fortement non linéaire sur la hauteur de la poutre
- Importance accrue du phasage de construction
- Problème des zones de transition "mixte simple" → "mixte double" (ressaut d'axe neutre)
- Allongement des délais de montage



Conception des âmes

1. Raidissage transversal

- Double rôle:
 - Contribuer au fonctionnement du système d'entretoisement
 - Raidir les âmes pour améliorer leur stabilité à l'effort tranchant
 - Principe de base: éviter les raidisseurs intermédiaires (entre entretoises) inutiles, sauf dans les zones de fort gradients de moment (appuis intermédiaires) où ils peuvent éventuellement être justifiés (balance à faire entre le coût des raidisseurs et celui d'une surépaisseur de l'âme)
- (autorisé par l'EN1993-1-5: raidisseurs verticaux requis explicitement uniquement aux appuis)

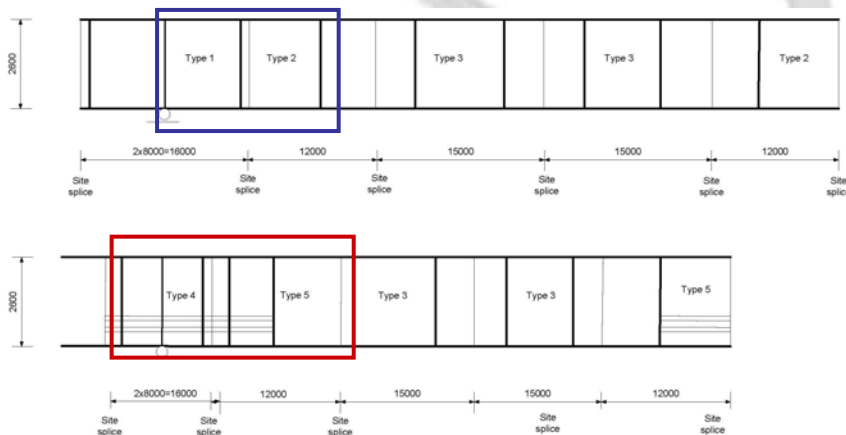


Conception des âmes

2. Raidissage longitudinal

- But: augmentation de la résistance de l'âme en flexion, mais surtout en cisaillement !
- Intérêt économique à relativiser en fonction de la hauteur d'âme

2 exemples (basés sur un calcul suivant EN 1993-1-5)



| Cross section | Top flange | Bottom flange | Web |
|---------------|------------|---------------|---------|
| Type 1 | 51x900 | 58x900 | 18x2491 |
| Type 2 | 26x700 | 40x700 | 16x2534 |
| Type 3 | 20x400 | 23x700 | 13x2557 |
| Type 4 | 53x900 | 56x900 | 15x2491 |
| Type 5 | 30x700 | 36x700 | 14x2534 |

→ Solution avec raidissage ($h_{\text{âme}} = 2,6\text{m}$): coût + 4% (18 Eur/m²)



Conception des âmes

2. Raidissage longitudinal

- But: augmentation de la résistance de l'âme en flexion, mais surtout en cisaillement !
- Intérêt économique à relativiser en fonction de la hauteur d'âme

2 exemples (basés sur un calcul suivant EN 1993-1-5)



| Cross section | Top flange | Bottom flange | Web |
|---------------|------------|---------------|---------|
| Type 1 | 77x1150 | 86x1150 | 24x3837 |
| Type 2 | 55x1000 | 57x1150 | 22x3888 |
| Type 3 | 43x600 | 55x1150 | 17x3902 |
| Type 4 | 80x1150 | 80x1150 | 21x3840 |
| Type 5 | 55x1000 | 54x1150 | 19x3891 |

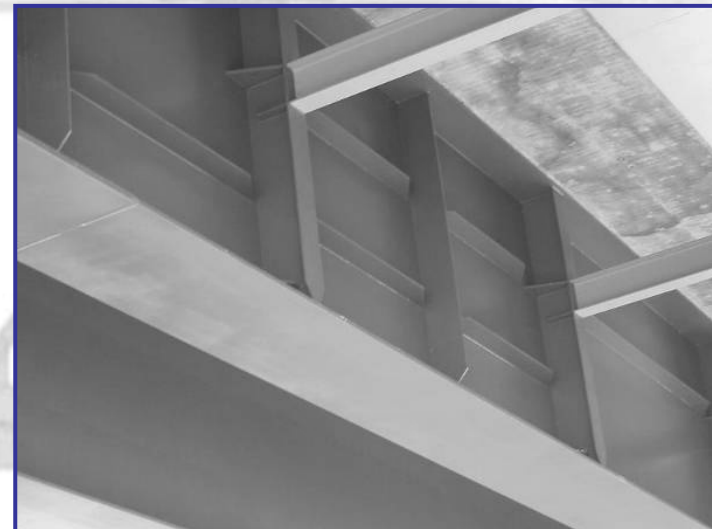
—————> Solution avec raidissage ($h_{\hat{a}me} = 4,0m$): coût + 0% (< 1 Eur/m²)



Conception des âmes

3. Réalisation pratique du raidissage longitudinal (problème de l'intersection avec le raidissage transversal)

- Raidisseurs ouverts, continus ou non

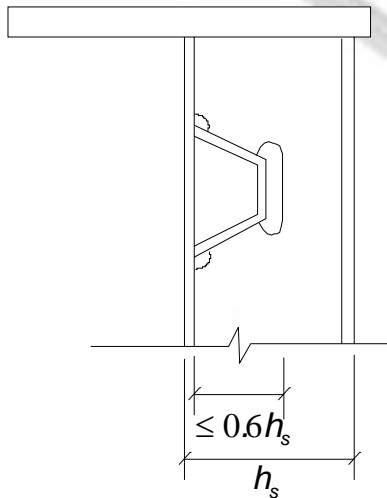




Conception des âmes

3. Réalisation pratique du raidissage longitudinal (problème de l'intersection avec le raidissage transversal)

- Raidisseurs ouverts, continus ou non
- Raidisseurs fermés

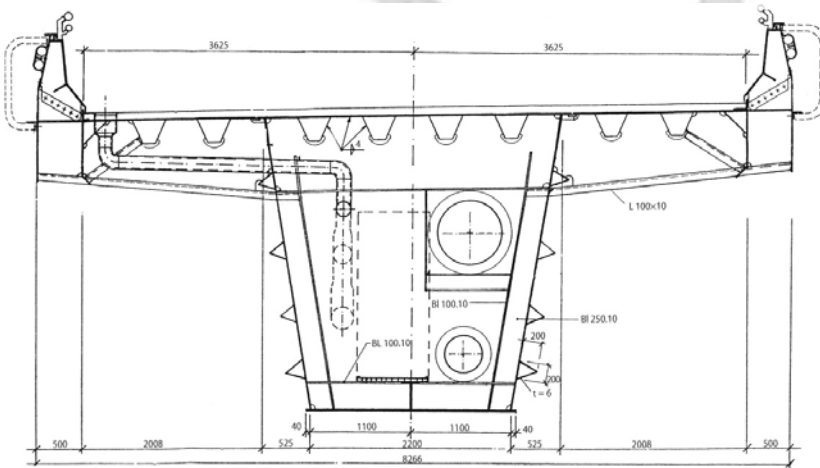




Conception des âmes

3. Réalisation pratique du raidissage longitudinal (problème de l'intersection avec le raidissage transversal)

- Raidisseurs ouverts, continus ou non
- Raidisseurs fermés
- Raidissage extérieur





Entretoises et diaphragmes

Rôles

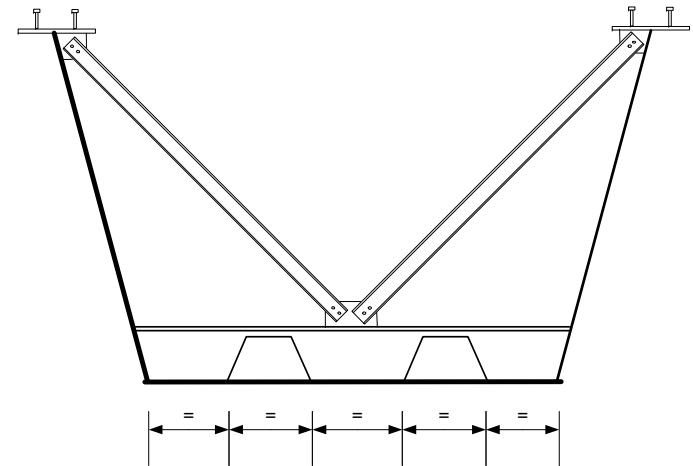
- Empêcher le déversement en phase de montage
- Distribuer les charges entre poutres (ponts à poutres multiples)
- Transférer les charges de vent vers le tablier
- Empêcher le déversement des semelles inférieures comprimées pour l'ouvrage en service
- Empêcher la distorsion de la section (pour les ponts en caisson)



Entretoises et diaphragmes

Caissons → Diaphragmes (ou cadres transversaux)

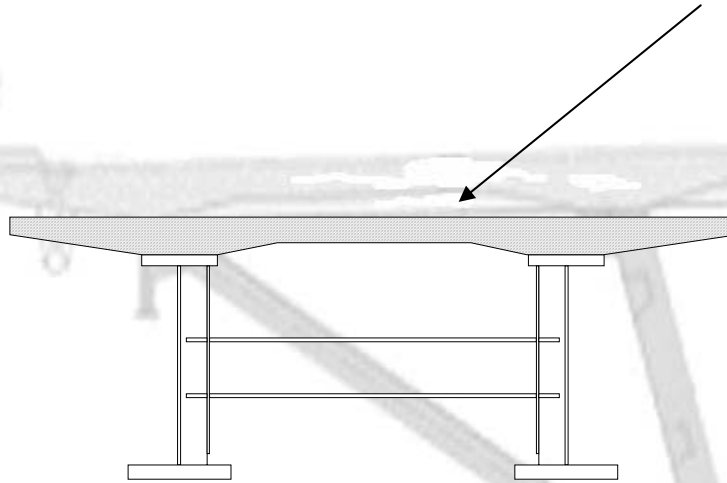
- Rôle essentiel: éviter la distorsion du caisson sous charges excentrées
 - Critère EN1993-2 : augmentation de contraintes dues à la distorsion inférieure à 10% par rapport aux contraintes de flexion
- Solution généralement la plus économique: contreventements transversaux sans éléments verticaux
 - Charges importantes
 - vérification des âmes au patch loading





Entretoises et diaphragmes

Bi-poutres → entretoisement en **cadre** ou **triangulé**

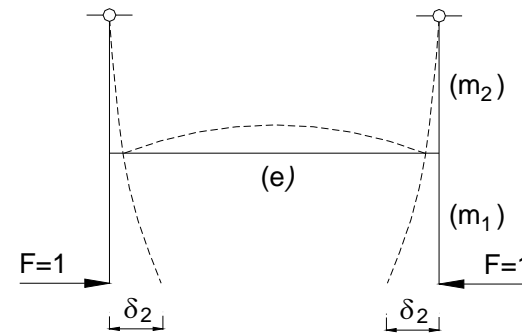
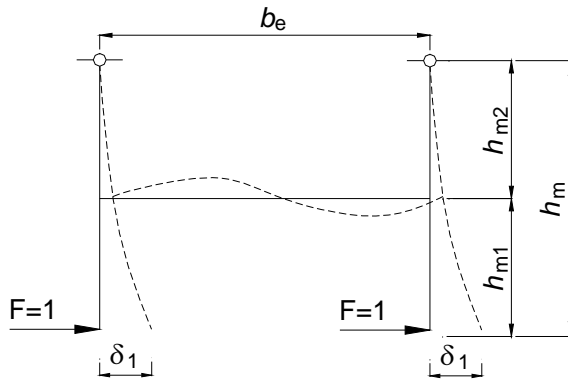




Entretoises et diaphragmes

Bi-poutres → entretoisement en **cadre**

→ Modélisation pour vérification du déversement de la semelle



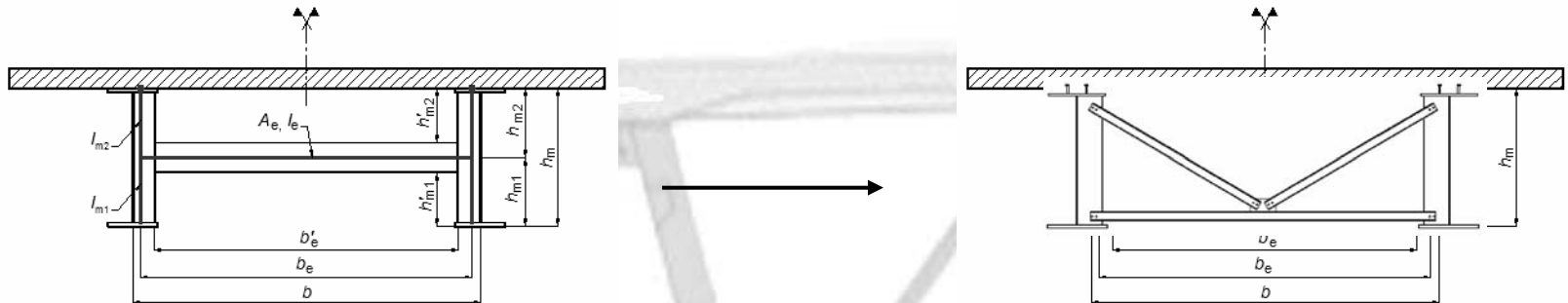
$$\chi_{op} \frac{\alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} = 1.002 > 1.0$$



Entretoises et diaphragmes

Bi-poutres

Comparaison Cadre / Triangulation (solutions soudées et boulonnées)



| | | Weight of one bracing frame [kg] | Number of bracing frames on the whole bridge | Total weight of the bracing frames [tons] | Saving |
|--------------|------------------|----------------------------------|--|---|--------|
| Frame type | non-strengthened | 1,180 | 13 | 28.9 | |
| | strengthened | 1,690 | 8 | | |
| Lattice type | non-strengthened | 640 | 13 | 13.9 | 52 % |
| | strengthened | 700 | 8 | | |



Mise en place par lancement





Mise en place par lancement

Dispositifs de lancement





Mise en place par lançage

Aspects à contrôler

- Cinématique du lançage (contrôle des déplacements verticaux)

→ avant-bec (20 à 30% de la longueur de travée)

- Stabilité transversale (déversement) en phase de montage

→ Contreventements horizontaux

- Vérification du "patch loading" (introduction de force concentrée), y compris interaction avec l'effort tranchant et la flexion





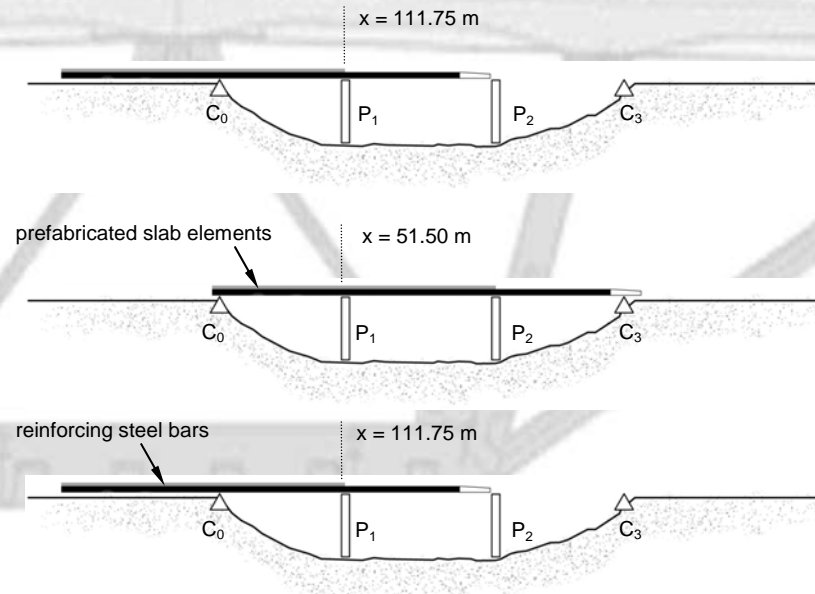
Mise en place par lançage

Possibilité de lançage avec tout ou partie de la dalle de béton

→ Cas du bi-poutre (voir exemple de calcul détaillé)

3 situations:

- Lançage des poutres seules
- Lançage des poutres + béton
- Lançage des poutres + armaturage





Mise en place par lançage

Possibilité de lançage avec tout ou partie de la dalle de béton

| | Launching with ... | | |
|---|--------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| | steel | steel and some slab elements | steel and reinforcing bars |
| Results with Sec. 6, EN 1993-1-5 | | | |
| bending (η_1) | 0.27 | 0.33 | 0.34 |
| patch load (η_2) | 0.35 | 1.00 | 0.46 |
| interaction ($\eta_1 + 0.8 \eta_2$) | 0.56 | 1.26 | 0.74 |
| margin | 60% | 10% | 47% |
| Results with Sec. 10, EN 1993-1-5, with a single buckling curve (Ann. B) | | | |
| pure patch ($=\eta_2$) | 0.46 | 1.29 | 0.61 |
| interaction | $1/1.73 = 0.58$ | $1/0.81 = 1.23$ | $1/1.32 = 0.76$ |
| margin | 42% | not verified! | 24% |