



Cerema

Centre d'études et d'expertise sur les risques,
l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction Territoriale Est

Dimensionner selon les Eurocodes – Conception d'un pont mixte innovant

AFGC – Les ouvrages d'art en bois
Conception, dimensionnement, entretien
FNTP 18 mars 2014

Philippe JANDIN – DTechITM CTOA
Fabien RENAUDIN – DTerEST DOA

Plan de l'exposé

Partie 1 – Présentation de l'EN1995

Partie 2 – Présentation d'un concept de pont mixte bois / béton

Partie 1 – Présentation de l'EN1995

Les Eurocodes

Les Eurocodes : un ensemble de normes de conception

EC0
Bases

EC1
Actions

EC2
Béton

EC3
Métal

EC4
Mixte

EC7
Fondations

EC5
Bois

=> Les bois : EC5

Le classement des actions

Les actions sont classées selon la durée de chargement

Tableau 2.2 1995-2/NA

Classe de durée de chargement	Exemples de chargement
Permanent	Poids propre, superstructures
Court terme	Charges de trafic caractéristiques, actions thermiques
Instantané	Situations ou actions accidentelles, vent

Les propriétés des matériaux

Principes *EN1995-1-1 3.1.4*

Les propriétés du matériau « bois » dépendent de l'humidité (classe de service) et de la durée de chargement.

- pour la détermination des résistances :

facteur de modification k_{mod}

- pour la détermination des paramètres de rigidités :

facteur k_{def}

Les propriétés des matériaux

Facteur k_{mod} *EN1995-1-1 3.1.4*

$$X_d = k_{\text{mod}} \frac{X_k}{\gamma_M}$$

EN1995-1-1 2.4.1 (1)P

k_{mod}

tableau 3.1 EN1995-1-1

				Classe de durée de chargement		
Matériau	Norme	Classe de service	Humidité moyenne dans les bois résineux	Action permanente	Action court terme	Action instantanée
BLC	EN 14080	1	<12%	0.60	0.90	1.10
		2	<20%	0.60	0.90	1.10
		3	>= 20%	0.50	0.70	0.90

Les propriétés des matériaux

Facteur k_{def} EN1995-1-1 3.1.4

ELS :
$$X_{mean, fin} = \frac{X_{mean}}{(1 + k_{def})} \quad EN1995-1-1 2.3.2.2 (1)$$

ELU :
$$X_{mean, fin} = \frac{X_{mean}}{(1 + \psi_2 k_{def})} \quad EN1995-1-1 2.3.2.2 (2)$$

 ψ_2 : facteur pour la valeur quasi-permanente de l'action qui génère la plus grande contrainte eu égard à la résistance

k_{def}

tableau 3.2 EN 1995-1-1

		Classe de service		
Matériau	Norme	1	2	3
BLC	EN 14080	0.6	0.8	2

Les propriétés des matériaux

Autres propriétés importantes :

Variations dimensionnelles *EN1995-1-1/NA 3.2(1)P*

⇒ Fonction de l'humidité (coefficient de variation dimensionnelle moyen pour les essences résineuses est de 0,25 % (β_{90}))

Coefficient de dilatation thermique du bois

EN1991-1-5 tableau C.1

- parallèle aux fibres : $5 \cdot 10^{-6}$
- perpendiculaire aux fibres : 30 à $70 \cdot 10^{-6}$

Bois

Section 4 de l'EN1995

Assurer la durabilité du bois c'est éviter l'humidité

- ⇒ risque majeur d'altération : dégradation fongique qui conduit à la pourriture
- ⇒ risque lié aux insectes : beaucoup plus modéré surtout pour des ouvrages extérieurs

La durabilité

Bois

- Classe d'emploi EN 335-Mars 2013 (en cohérence avec la classe de service)
- Durabilité naturelle EN 350-2
- Traitement de préservation EN 351-1 et EN460
- FD P 20-651 juin 2011 : Durabilité des éléments et ouvrages en bois
- Guide SETRA « Les ponts en bois – Comment assurer leur durabilité » – novembre 2006

La modélisation de la structure

Le modèle doit prendre en compte

- la déformations des assemblages *EN1995-1-1 5.1 (4)P*
- en particulier l'analyse des tabliers mixtes doit prendre en compte l'influence du glissement des connexions *EN1995-2 5.2 (1)P*

Annexe B - EN 1995-1-1

Rigidité efficace en flexion :

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^2 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

1995-1-1 - Annexe B

Contraintes normales et contraintes de cisaillement maximum :

Terme de traction,
compression

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i}{(EI)_{ef}} . M$$

Terme de flexion

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 E_i h_i}{(EI)_{ef}} . M$$

Cisaillement

$$\tau_{2,\max} = \frac{0,5 E_2 h^2}{(EI)_{ef}} . V$$

Charge par organe d'assemblage :

$$F_1 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 a_1 s_1}{(EI)_{ef}} . V$$

La modélisation de la structure

Le modèle doit prendre en compte

- la largeur effective de la table de compression en béton *EN1995-2 5.3 (3), (4) et (5)*

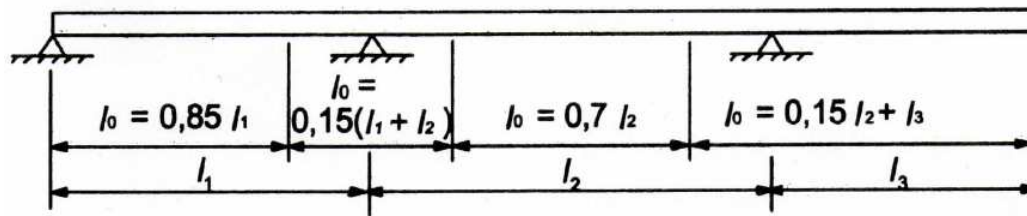


Figure 5.2 : Définition de l_0 pour le calcul de la largeur participante de la table de compression

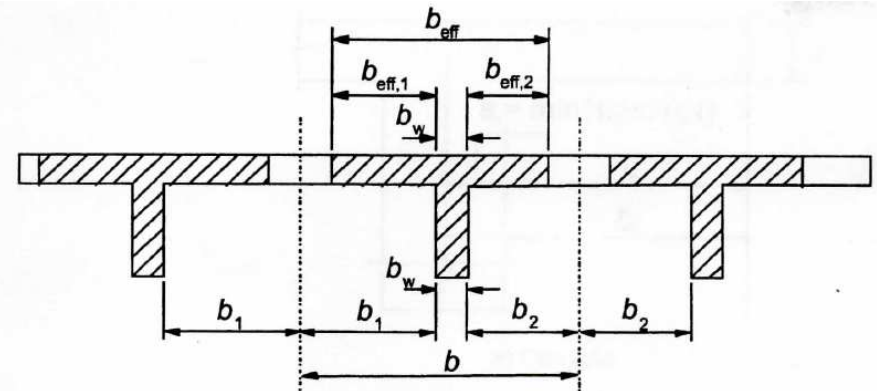


Figure 5.3 : Paramètres déterminant la largeur participante

- le phasage de réalisation
- le fluage des matériaux
- la fissuration du béton

Justification des sections - ELU

Contrainte normale dans une section mixte sous moment de flexion positif

Flexion et traction axiale combinées

EN1995-1-1 6.2.4 (1)P

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5E_i h_i}{(EI)_{ef}} . M$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i}{(EI)_{ef}} . M$$

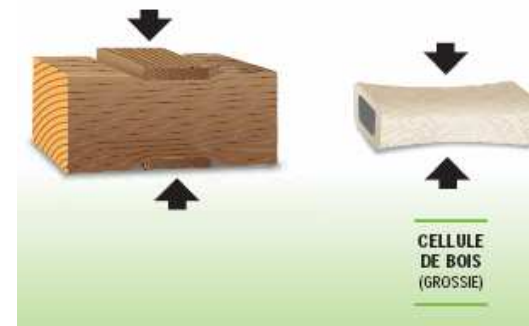
Justification des sections - ELU

Contrainte sur l'appareil d'appui

Compression perpendiculaire au fil

EN1995-1-1 / A1 6.1.5 (1)P

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \leq k_{c,90} f_{c,90,d}$$



*Illustrations :
Guide CECO-bois
Conception des
assemblages pour
les charpentes en
bois*

$k_{c,90}$: facteur tenant compte de la configuration du chargement de la possibilité de fendage et d'un degré de déformation en compression

A_{ef} : aire de contact efficace perpendiculaire au fil

Justification des sections - ELU

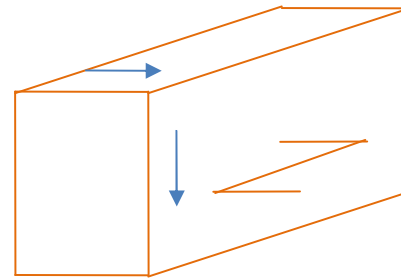
Contrainte de cisaillement

Cisaillement : *EN1995-1-1 6.1.7 (1)P*

Cisaillement avec composante de contrainte perpendiculaire au fil

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

$$\tau_{2,\max} = \frac{0,5E_2h^2}{(EI)_{ef}} \cdot V$$



Prise en compte de la fissuration – largeur efficace b_{ef} :

$$b_{ef} = k_{cr} b$$

avec $k_{cr} = 0,67$ pour le BLC

Les assemblages

Glissement des assemblages

Organe de type tige : Broches - Boulons sans jeu - Tire-fonds

EN1995-1-1 7.1. (1) - Tab 7.1

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \frac{d}{23}$$

K_{ser} : module de glissement par plan de cisaillement et par organe en N/mm;

$$K_u = \frac{2}{3} K_{ser} \quad \text{EN1995-1-1 2.2.2 (2)}$$

Pour les assemblages bois – métal ou bois – béton, il est possible de multiplier K_{ser} par 2,0

Les assemblages par organes métalliques

Résistance : ex des tire-fonds

Résistance latérale (1 file d'organe parallèle à la direction du fil) :
EN1995-1-1 8.1.2 (4)

$$F_{v,ef,Rk} = n_{ef} F_{v,Rk}$$

Résistance axiale (Valeur caractéristique de la capacité à l'arrachement à un angle α)

EN1995-1-1 /A1 8.7.2 (4)

$$f_{ax,k} = 0,52.d^{-0,5}.l_{ef}^{-0,1}\rho_k^{0,8}$$

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} .d .l_{ef} f_{ax,k} .k_d}{1,2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}$$

$$k_d = \min \left\{ \frac{d}{8}, 1 \right\}$$

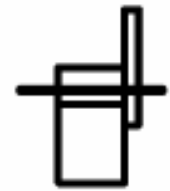
Les assemblages par organes métalliques

Capacité résistance latérale

Exemple : assemblage bois – métal *EN1995-1-1 / A1 8.2.3 (3)*

Plaque métallique épaisse en simple cisaillement

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{h,k} t_1 d & (c) \\ f_{h,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (d) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (e) \end{array} \right.$$



c



d



e

Les assemblages par organes métalliques

Capacité résistance latérale

Valeur caractéristique du moment d'écoulement plastique

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6}$$

Valeur caractéristique de la portance locale du bois à un angle α vis-à-vis du fil ($d \leq 30 \text{ mm}$) - EN1995-1-1 8.5.1.1 (2)

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$$f_{h,0,k} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k \text{ en N/mm}^2 \quad k_{90} = 1,35 + 0,015 d \text{ pour les résineux}$$

Les assemblages par organes métalliques

Cisaillement de bloc *EN1995-1-1 annexe A*

- Assemblage bois – métal

A proximité des extrémités de l'élément en bois, la capacité de résistance est affectée par une rupture qui survient selon le périmètre du groupe d'organes

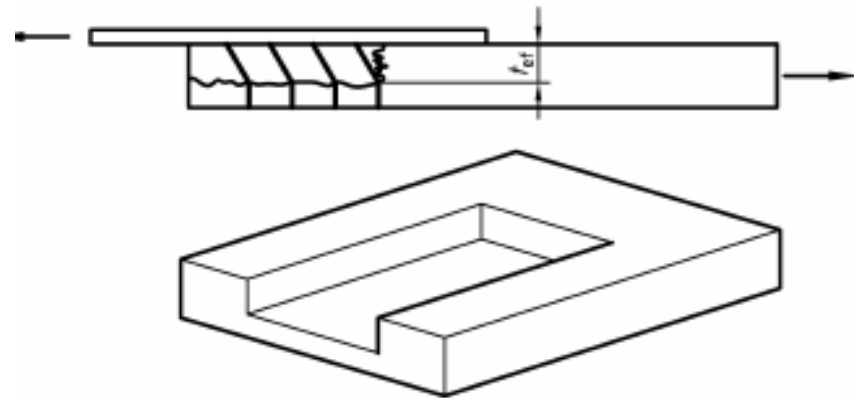


Figure A.2 — Rupture par cisaillement de bloc partiel dû à la flexion/rotation des tiges.

Fatigue *EN1995-2 Annexe A*

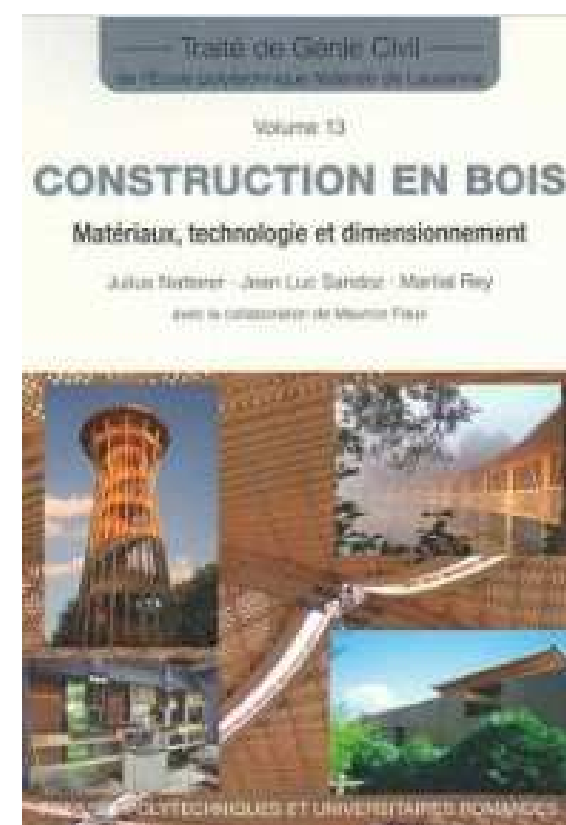
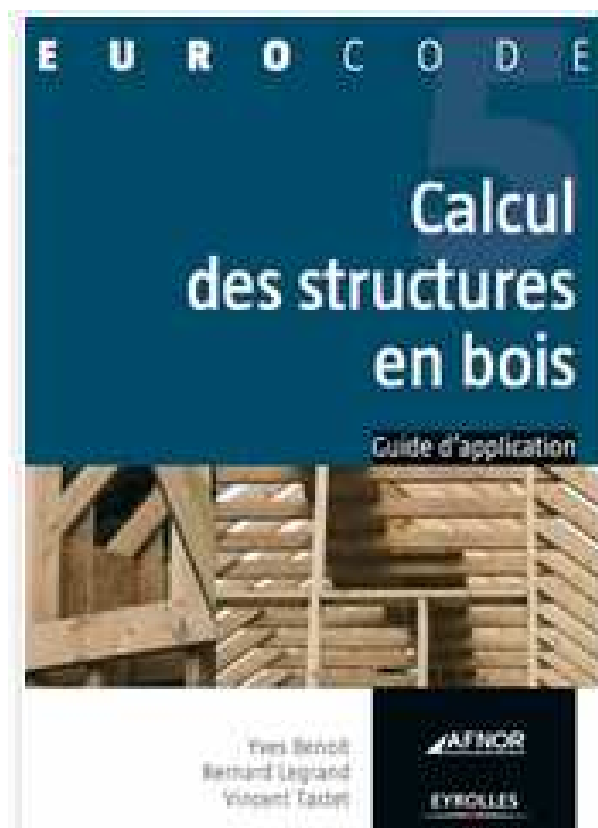
Vérification nécessaire pour les structures et assemblages soumis à de fréquentes variations de sollicitations dues au trafic ou au vent

Méthode simplifiée donnée par 1995-2- Annexe A

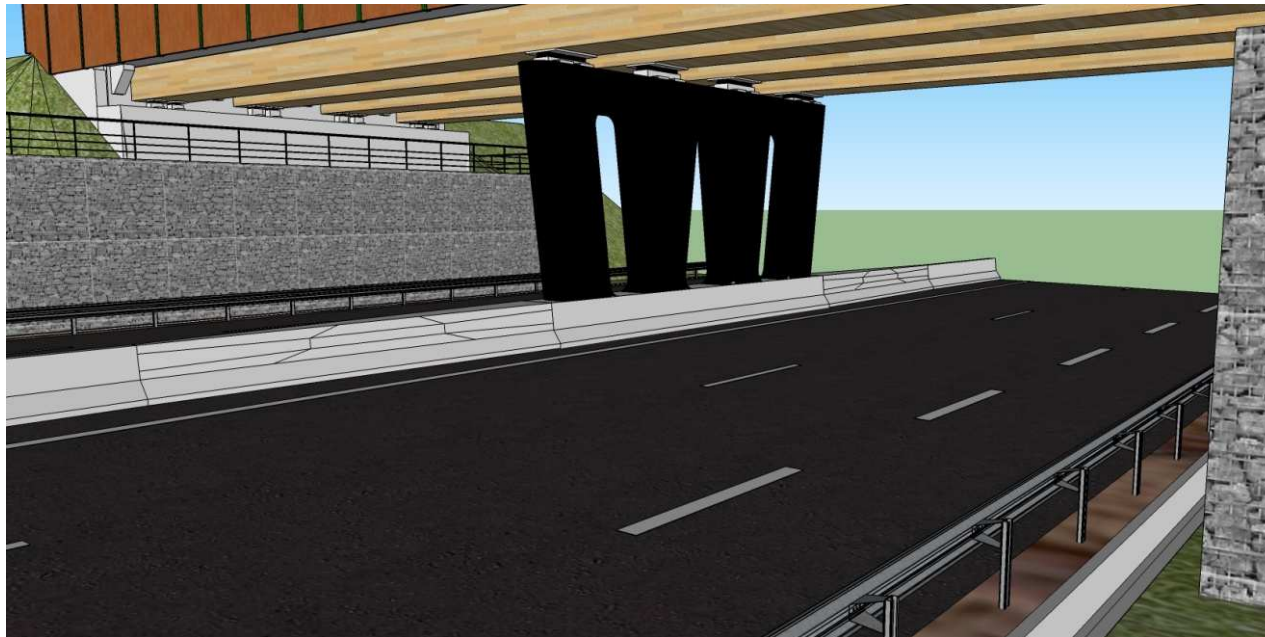
- Modèle de charge de fatigue d'amplitude constante
- Analyse élastique de la structure en tenant compte de la rigidité des assemblages

Conception des structures en bois

Quelques ouvrages



Partie 2 – Présentation d'un concept de pont mixte bois / béton



Concept d'un pont mixte bois / béton

Groupe de travail :

Cerema (DtechITM - DTerEst) – IFSTTAR / Navier – ENSTIB – DIR Est

Principes généraux de la conception

Détails des choix de conception

Points particuliers de la justification

Concept d'un pont mixte bois / béton

Principes généraux de conception

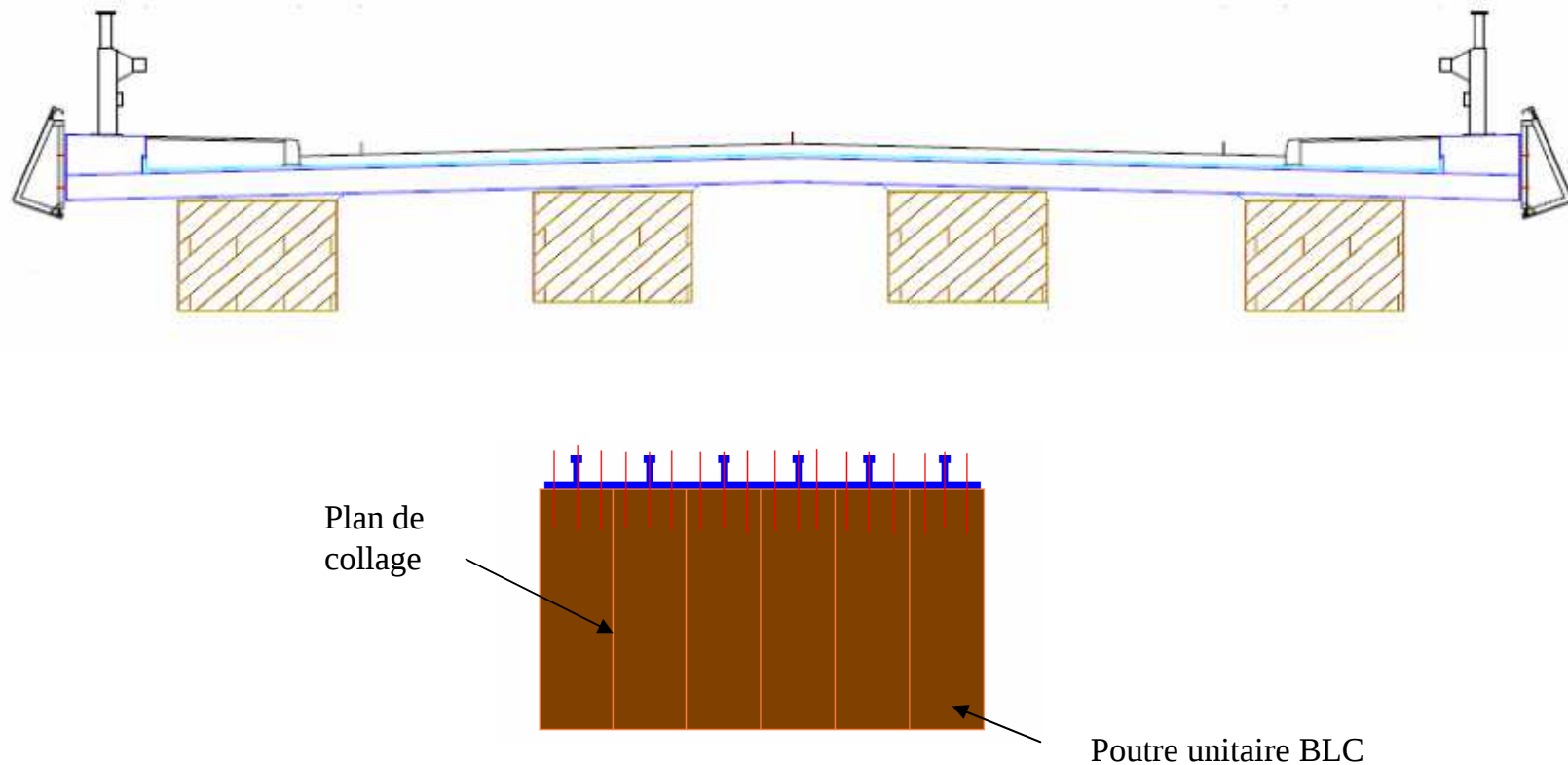
Concevoir un pont routier mixte bois / béton faisant participer le béton via une connexion

Disposer d'un concept simple permettant d'en faire un ouvrage

- de conception courante
- répondant aux exigences des maîtres d'ouvrage en matière de robustesse, de développement durable et de gestion
 - justifiable selon les Eurocodes
 - assurant une protection durable du bois
 - d'un coût compétitif

Concept d'un pont mixte bois / béton

Principes généraux de conception



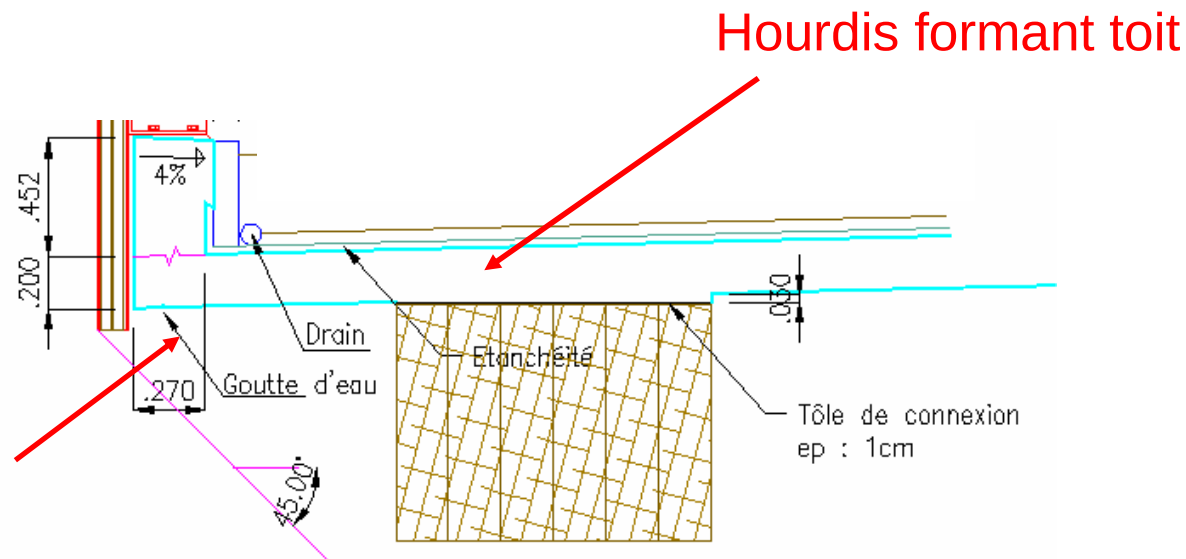
Choix de conception

Assurer la protection des poutres

Pont à poutres sous chaussée : poutres protégées des intempéries, jusqu'à un angle de 45° par rapport à la verticale, grâce à :

- Un encorbellement au moins égal à la hauteur d'une poutre ;
- Éventuellement un écran descendant plus bas que l'intrados du hourdis

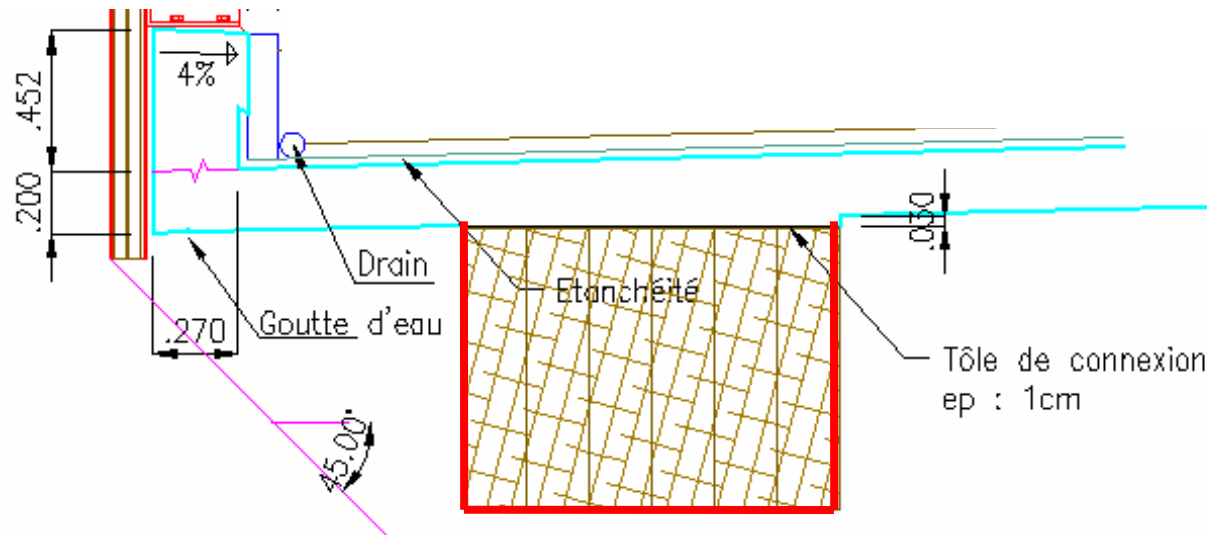
Encorbellement protégeant de l'exposition à la pluie directe



Choix de conception

Assurer la protection des poutres

Nervures massives plutôt que tablier multi-poutres : permet de diminuer significativement les surfaces exposées. Le bois à cœur est protégé.



Périmètre exposé sur section :

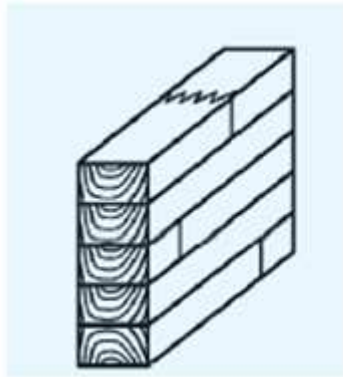
rapport : 4

Choix de conception

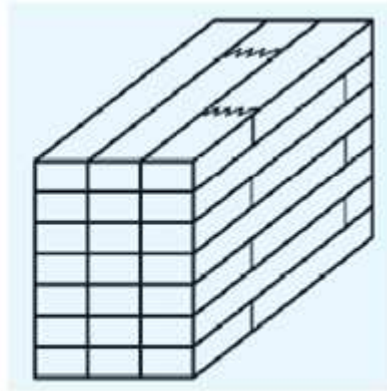
Assurer la protection des poutres

Nervures massives : bois lamellé collé en bloc visé par l'EN14080 :

- **5.4 Exigences complémentaires pour la résistance mécanique de bois lamellé collé en bloc**
- **5.5.7 Collage des bois lamellé collé en bloc**



poutre en bois lamellé-collé



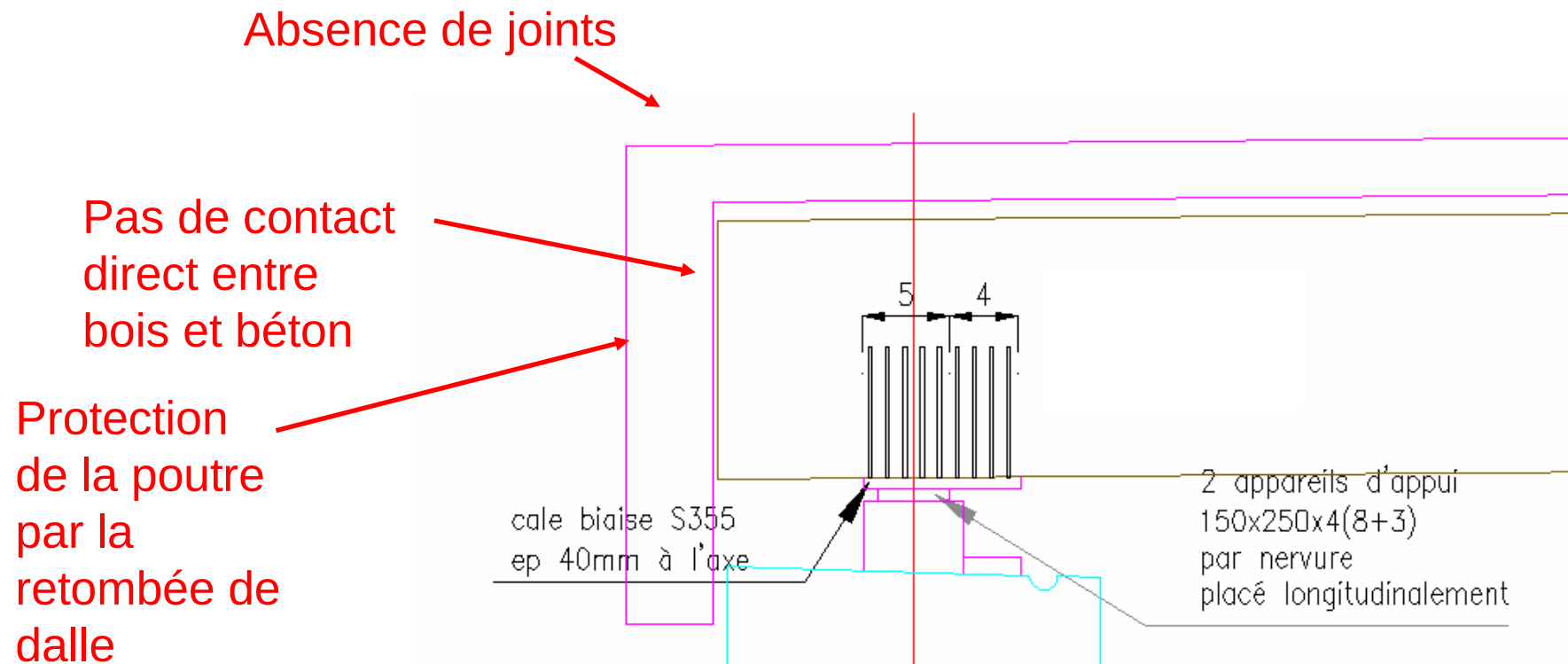
nervure en bois lamellé-collé en bloc



Choix de conception

Assurer la protection des poutres

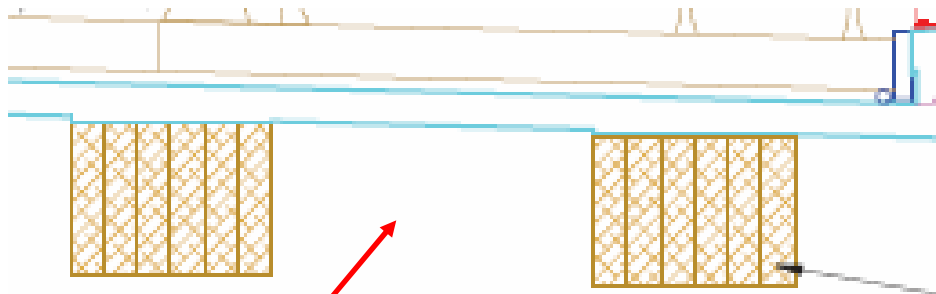
Conception semi-intégrale : retombée de dalle en guise de garde-grève => protection supplémentaire aux abouts des poutres



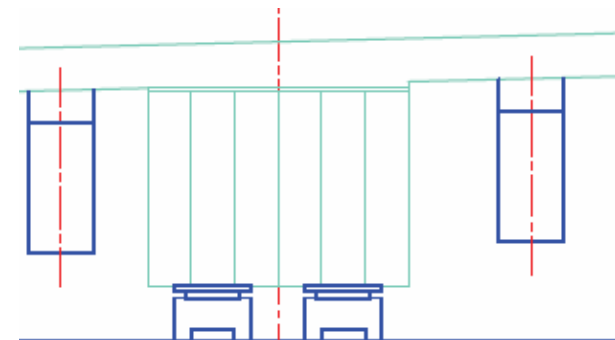
Choix de conception

Projeter une structure simple et robuste

Nervures massives : gain en construction et durabilité : pas de système d'entretoisement, bonne stabilité en torsion, charges diffusées sur appui, meilleure résistance aux chocs, très faible variations dimensionnelles liées à l'humidité.



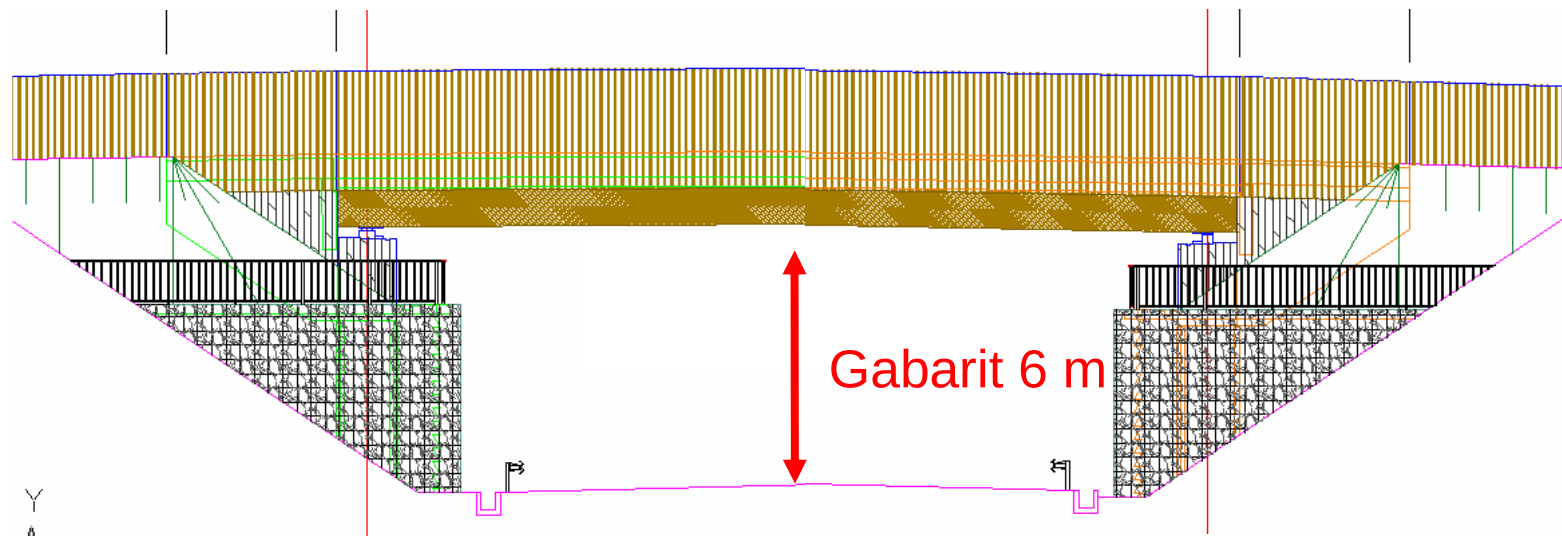
Absence d'éléments
d'entretoisement



Choix de conception

Projeter une structure robuste

Privilégier un gabarit important permettant de mieux protéger les poutres des embruns et des chocs



Choix de conception

Choisir une essence et une qualité de bois adaptées

Selon le site d'exposition : le plus généralement bois en
classe d'emploi 2

Privilégier une classe de résistance courante : **GL24h**

Privilégier un choix basé sur la durabilité naturelle :

- par ex : Douglas sans traitement de préservation ;

Dimensionner avec un béton classique

Choix de conception

Application de FD P 20-651 2011-06

Performances des essences de bois vis-à-vis des différents agents de dégradations biologiques

- Solution « Durabilité naturelle » risques fongiques et insectes

Tableau 4 — Essences de bois européens

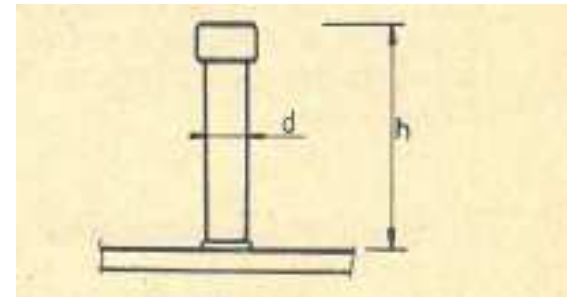
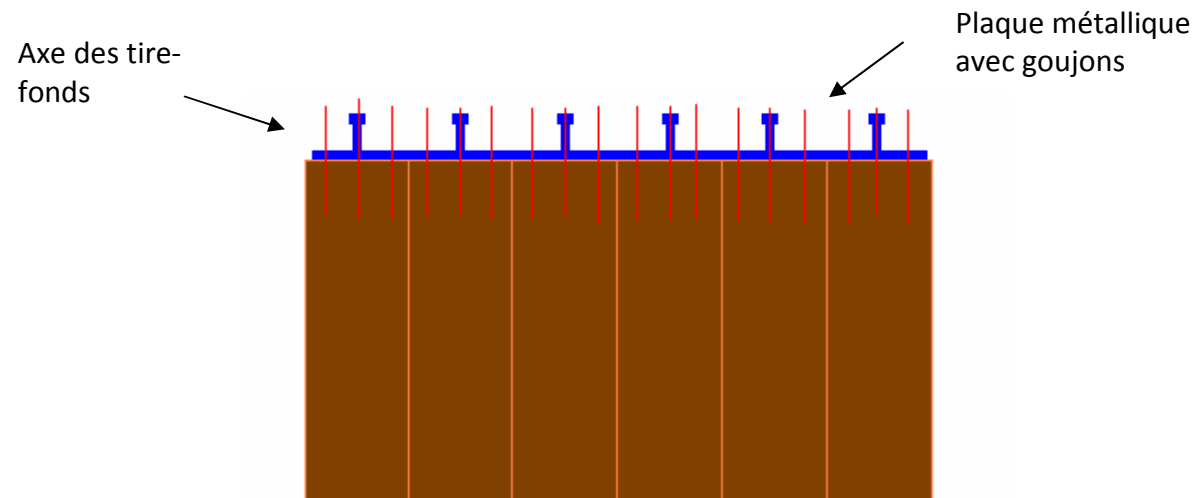
Essences de bois purgées d'aubier (2)			Durabilité fongique et classe d'emploi					Résistance aux insectes à larves xylophages	Résistance aux termites (3)
Nom standard	Espèce botanique	Code	1	2	3a	3b	4		
Douglas	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	PSMN	L3	L3	L2	L1	N	oui	non
Épicéa (*)	<i>Picea abies</i>	PCAB	L3	L2	L1	N	N	non	non
Sapin blanc (*)	<i>Abies alba</i>	ABAL	L3	L2	L1	N	N	non	non

Longévité : L 3 : 100 ans ; L 2 : 50 à 100 ans ; L1 entre 10 et 50 ans ; N : à ne pas prescrire;

Choix de conception

Assurer la connexion bois / béton

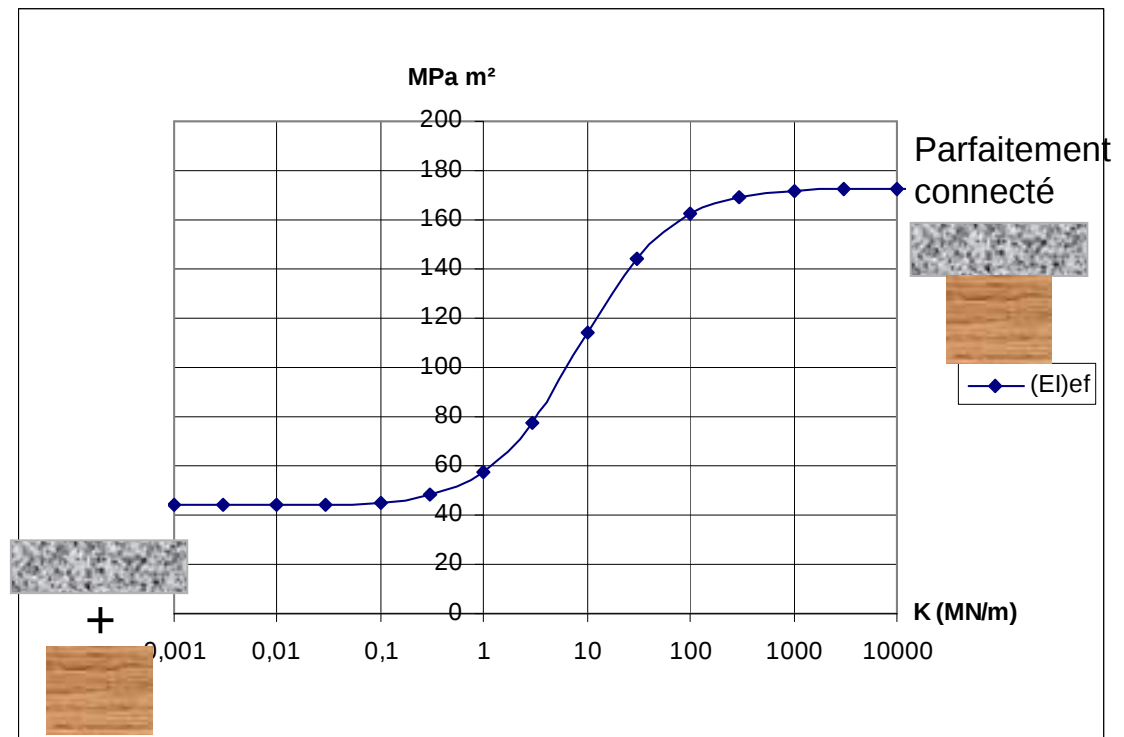
Choix d'un système dimensionnable suivant les Eurocodes



Choix de conception

La connexion

Principe : connecteurs de type tige travaillant dans le sens du fil associés à une plaque métallique équipée de goujons.



Choix de conception

La connexion

Essais A.Blonski – R. Le Roy IFSTTAR / Navier

Principaux enseignements :

- Raideur plus importante que la raideur réglementaire
- Système ductile
- Effets importants des frottements (effets de serrage des tire-fonds)



Choix de conception

La connexion

Essais de fatigue IFSTTAR C. Douthe – CETE de L'Est LRPC Nancy

Objectif : étudier l'évolution dans le temps de la raideur de connexion



Choix de conception

La connexion

Essais de fatigue IFSTTAR C. Douthe – CETE de L'Est LRPC Nancy

Principaux enseignements :

- Raideur plus importante que la raideur réglementaire
- Bonne tenue en fatigue : aucun dommage notable, diminution de l'ordre de 10% de la raideur qui reste nettement supérieure à la valeur de l'Eurocode
- Résistance ultime élevée : après chargement en fatigue la résistance résiduelle est environ deux fois supérieure à la résistance caractéristique de l'Eurocode
- Bonne ductilité

Points particuliers de la justification

Hypothèses générales

Durée d'utilisation de projet : **100 ans** en général

Classe de service 2 en lien avec la classe d'emploi

k_{mod}	0.6 sous actions permanentes 0.9 sous actions de court terme
k_{def}	0.8

Classe de trafic : **classe 2** en général

Charges de fatigue : à définir selon le site

Données climatiques : Humidité relative moyenne, variation de température et gradient thermique

Points particuliers de la justification

Modélisation

En général : une seule poutre modélisée avec choix d'une méthode adaptée de répartition transversale des charges (Courbon, Guyon,...).

Analyse élastique linéaire du premier ordre éventuellement en deux étapes => *analyse non fissurée puis analyse fissurée*

Prise en compte :

- du phasage de réalisation
- des redistributions de fluage des matériaux et de retrait du béton

Modélisation simplifiée (rigidité parfaite, Eleff), Girhammar, Kreuzinger ou MEF

Points particuliers de la justification

Combinaison d'actions et valeur de k_{mod}

Justification sous situations de projet :

- situations de projet transitoires
- situations de projet durables
- situations de projet accidentelles

=> pour chaque situation : définition des combinaisons de l'Etat Limite de Service (ELS) et de l'Etat limite Ultime (ELU).

Ex : situation durable – combinaison fondamentale ELU

$$1,35 G_{k\ sup} \text{ (ou } 1,0 G_{k\ inf}) + S + 1,35 (UDL_k + TS_k + qf_{k\ comb}) + 1,5 \cdot 0,6 T_k$$

$$1,35 G_{k\ sup} \text{ (ou } 1,0 G_{k\ inf}) + S + 1,5 T_k + 1,35 (0,4 UDL_k + 0,75 TS_k + 0,4 qf_{kcomb})$$

Points particuliers de la justification

Combinaison d'actions et valeur de k_{mod}

A la mise en service :

k_{mod} ajusté à sa valeur correspondant à l'action variable considérée dans la combinaison

A long terme : 2 vérifications

-la première avec k_{mod} ajusté à sa valeur correspondant à l'action variable considéré dans la combinaison.

- la seconde avec k_{mod} ajusté à sa valeur correspondant aux actions permanentes pour les combinaisons où seules les actions quasi-permanentes agissent.

Points particuliers de la justification

Détermination des sollicitations – principes simplifiés

Dimensionnement de la connexion en rigidité parfaite

Dimensionnement des sections sur la base du calcul de la rigidité réglementaire ou d'une rigidité déterminée sur la base d'essais

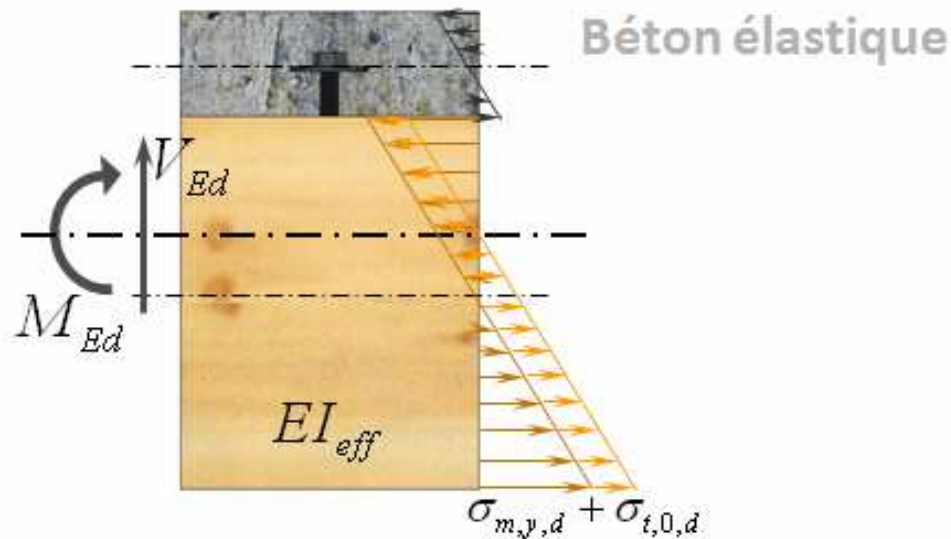
Vérification en situation accidentelle sous hypothèses de défauts de connexion

Points particuliers de la justification

Caractéristiques de la section mixte

Sous moment positif

$$E_{eff} (EC5) \approx 85 \% EI \text{ parfait}$$



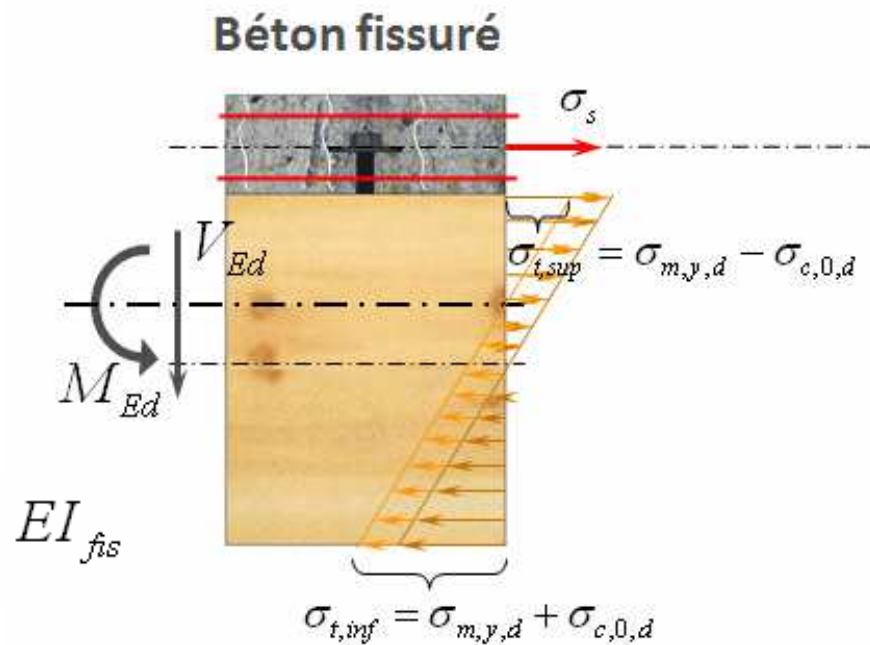
Le béton travaille en flexion + traction

Points particuliers de la justification

Caractéristiques de la section mixte

Sous moment négatif

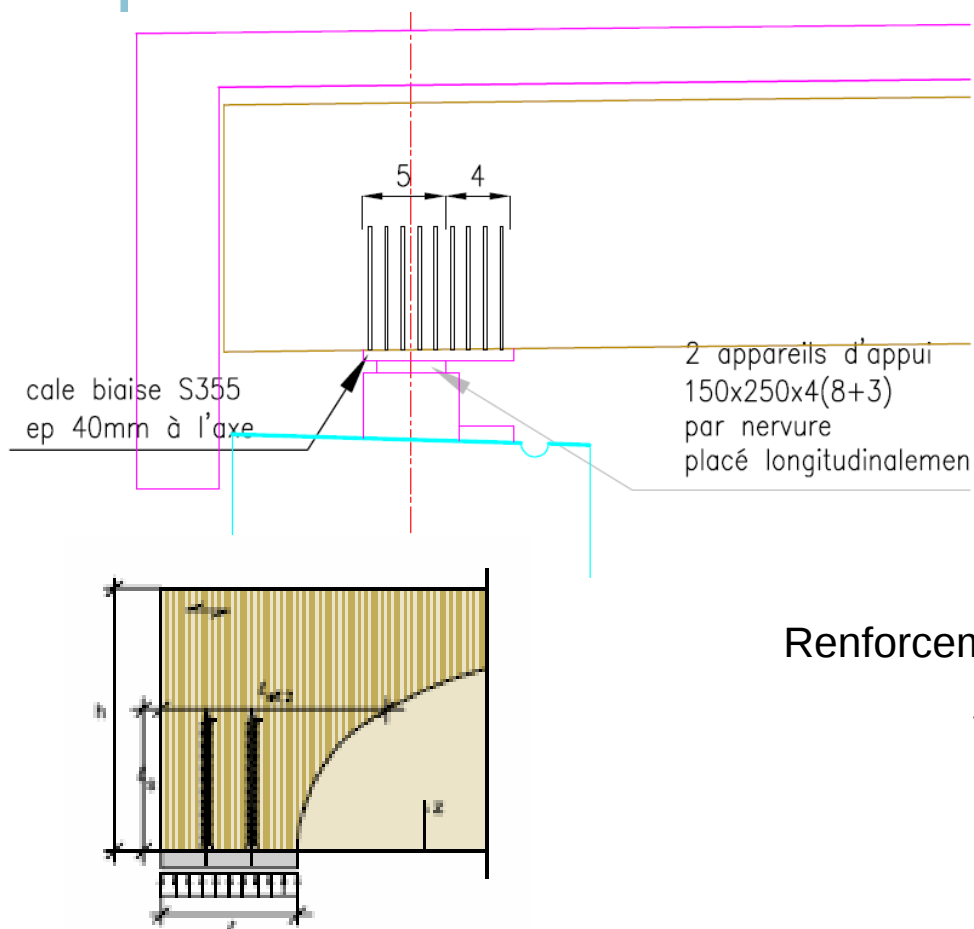
Participation de la tôle de connexion et des aciers passifs



Le béton travaille en flexion + compression

Points particuliers de la justification

Compression transversale sur appui



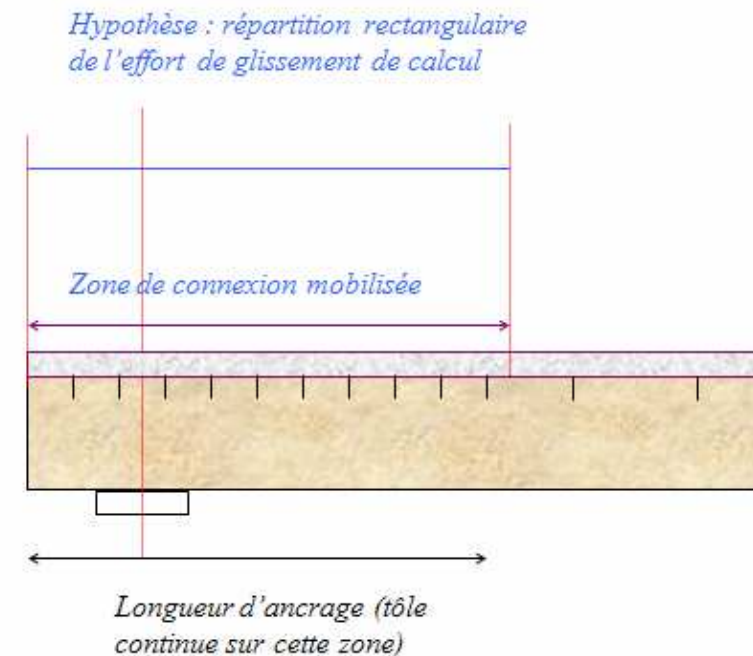
Points particuliers de la justification

Connexion aux abouts

Nécessité d'ancrer les effets du **retrait** du béton et des **actions thermiques** (gradient, variation uniforme de température liée à la différence de coefficient de dilatation) en tenant compte du glissement lié aux actions extérieures

Renforcement de la connexion aux abouts

Vérification du cisaillement de bloc



En synthèse...

Une conception innovante par sa sobriété

Des bois abrités des intempéries,

Des poutres massives favorisant la durabilité, supprimant l'entretoisement, plus résistantes au choc et offrant de larges surfaces d'appui,

Une conception semi-intégrale des culées limitant l'humidité dans les zones d'appui,

Un système de connexion efficace, résistant en fatigue et participant à la résistance en cas de travées continues,

Merci de votre attention