

Le pont type à ossature bois/béton du Sétra

Conception détaillée
et zones d'about

Vincent BRUN

CETE de l'Est

Jean-François BOCQUET

ENSTIB

Resources, territoires et habitats
Énergie et climat. Développement durable
Prévention des risques. Infrastructures, transports et rgr

**Présent
pour
l'avenir**



CONCEPTION ET GESTION DES OUVRAGES D'ART EN BOIS :
Les nouvelles avancées

Le pont type à ossature bois/béton

Conception détaillée et zones d'about



Vincent BRUN - CETE de l'Est

Jean-François BOCQUET - ENSTIB



Conception détaillée et zones d'abouts

- Rappel de la conception générale
- Connexion poutres / hourdis BA-BHP
- Connexion poutres / hourdis BFUP
- Entretoisement des poutres
- Traitement des abouts
- Solution retenue
- Continuité sur piles
- Frettage sur appuis

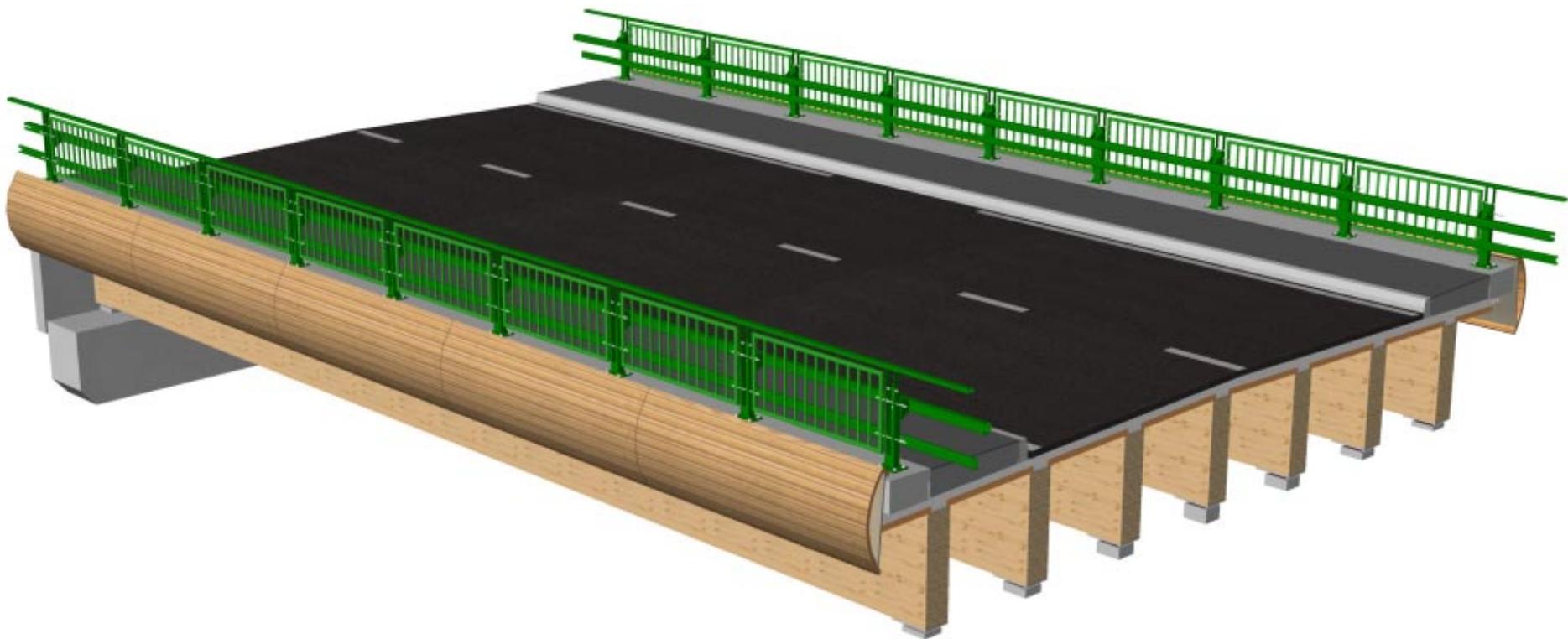
Rappel de la conception générale

Ouvrage type « poutres sous chaussées »

Poutres principales en lamellé-collé GL28h

Hourdis en béton armé « classique », béton haute performance ou béton fibré ultra performant

Ensemble poutres/hourdis connecté



Connexion



Connexion poutre / hourdis BA

Pourquoi connecter ?

- Participation du hourdis à la reprise des efforts (flexion sous superstructures et surcharges)
- Diminution de la hauteur des poutres en bois lamellé-collé
- Gain d'environ 30 à 35% sur le volume de bois (EPOA OA5 rocade de Strasbourg)

Comment connecter ?

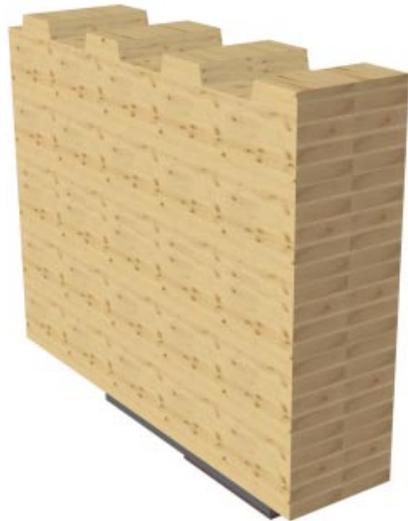
- Collage,
- Embrèvement,
- Organes métalliques...

Contraintes ?

- Durée de vie,
- Coût, facilité de réalisation,
- Liberté d'emploi (brevet)...

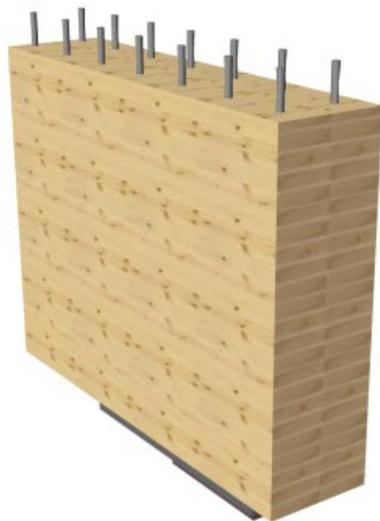
Connexion poutre / hourdis BA

Solution 1



Une liaison assurée par une série d'encoches transversales offre une bonne raideur. En effet, la transmission de l'effort de cisaillement se fait par compression de la dalle sur les faces latérales du bois en bout et par adhérence. Le maintien de la dalle se fait par le poids propre de la dalle.

Solution 2



La liaison est assurée par les tubes scellés par collage dans les poutres. Les poutres sont percées en usine, et l'espace entre le bois et les tubes est comblé par une résine.

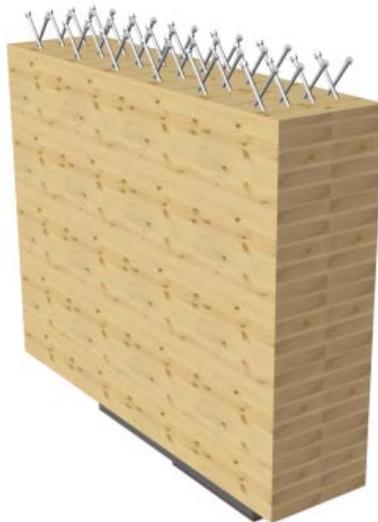
Connexion poutre / hourdis BA

Solution 3



La liaison est ici assurée par l'intermédiaire de tire-fond inclinés. Ces organes semblent montrer des valeurs de raideur intéressantes.

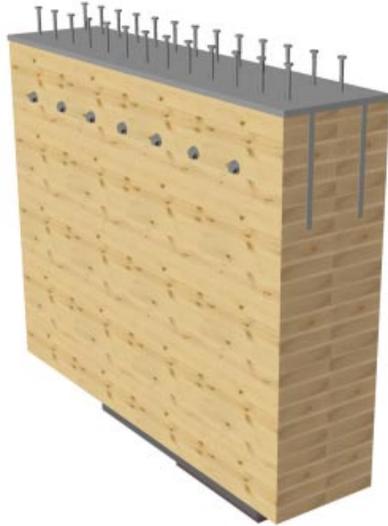
Solution 3bis



De plus, leur inclinaison les fait travailler principalement en traction et en cisaillement. Ils offrent ainsi des valeurs de raideur plus élevées qu'avec les tire-fond verticaux.

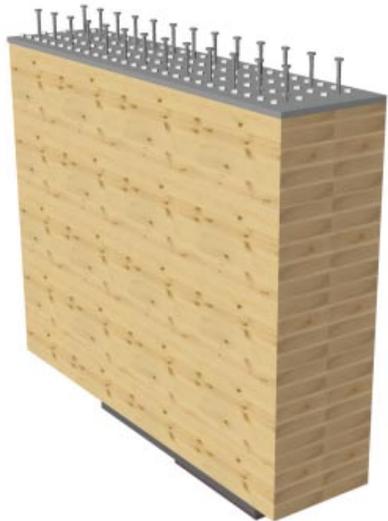
Connexion poutre / hourdis BA

Solution 4



Un demi-profilé métallique en T est pris en sandwich et liaisonné aux poutres bois par une série de broches transversales disposées tout le long des poutres. Ce type de liaison est plus performant en termes de rigidité dans la mesure où on multiplie les plans de cisaillement de l'organe par le nombre de plans cisailés.

Solution 5



Une platine métallique est placée entre la poutre bois et la dalle en béton. Elle est liaisonnée au bois par des tire-fond et au béton par des goujons mécano-soudés. La raideur de l'assemblage est donnée par le nombre de tire-fond associés à chaque goujon.
La platine métallique apporte peu d'inertie à la l'ensemble poutre/dalle.

Connexion poutre / hourdis BA



Présentation des corps d'essais ENPC :

- Tire-fond diam. 16
- Tire-fond diam. 16 renforcé par rondelles
- Plaque, goujons diam. 16, tire-fond diam. 10



Connexion poutre / hourdis BA

Raideur des assemblages selon EC5 :

- Tire-fond diam 16 : $K_{ser} := 2 \times 410^{1.5} \cdot \frac{16}{23} \cdot \frac{N}{mm}$ soit $K_{ser} = 1.15504 \times 10^7 \frac{N}{m}$ (par organe)
- 4 tire-fond diam 10 : $K_{ser} := 2.4 \times 410^{1.5} \cdot \frac{10}{23} \cdot \frac{N}{mm}$ soit $K_{ser} = 2.88761 \times 10^7 \frac{N}{m}$ (par organe)
- Broche diam 16 : $K_{ser} := 2 \times 410^{1.5} \cdot \frac{16}{23} \cdot \frac{N}{mm}$ soit $K_{ser} = 1.15504 \times 10^7 \frac{N}{m}$ (par organe)

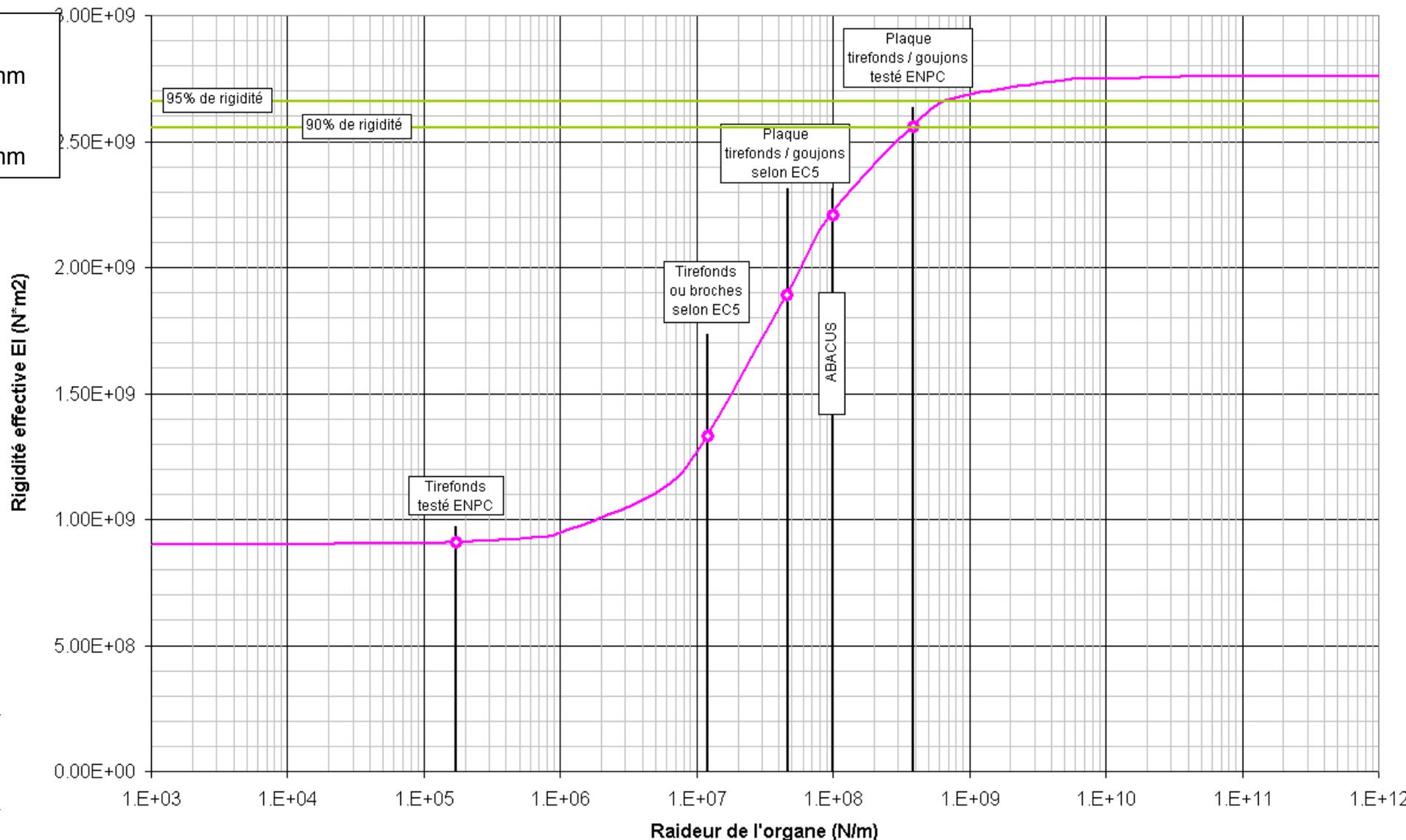
Résultats des essais Labo :

- Tire-fond diam 16 : $K_{ser} := 175 \cdot \frac{kN}{m}$ soit $K_{ser} = 1.75 \times 10^5 \frac{N}{m}$ (par organe)
- Tire-fond diam. 16 renforcé par rondelles :
 $K_{ser} := 210 \cdot \frac{kN}{m}$ soit $K_{ser} = 2.1 \times 10^5 \frac{N}{m}$ (par organe)
- Plaque, goujons diam. 16, tire-fond diam. 10 :
 $K_{ser} := 375 \cdot \frac{10^6 \cdot N}{m}$ soit $K_{ser} = 3.75 \times 10^8 \frac{N}{m}$ (par organe)

Connexion poutre / hourdis BA

Rigidité effective $E \cdot I$ d'une poutre mixte selon la méthode de Heimeshoff

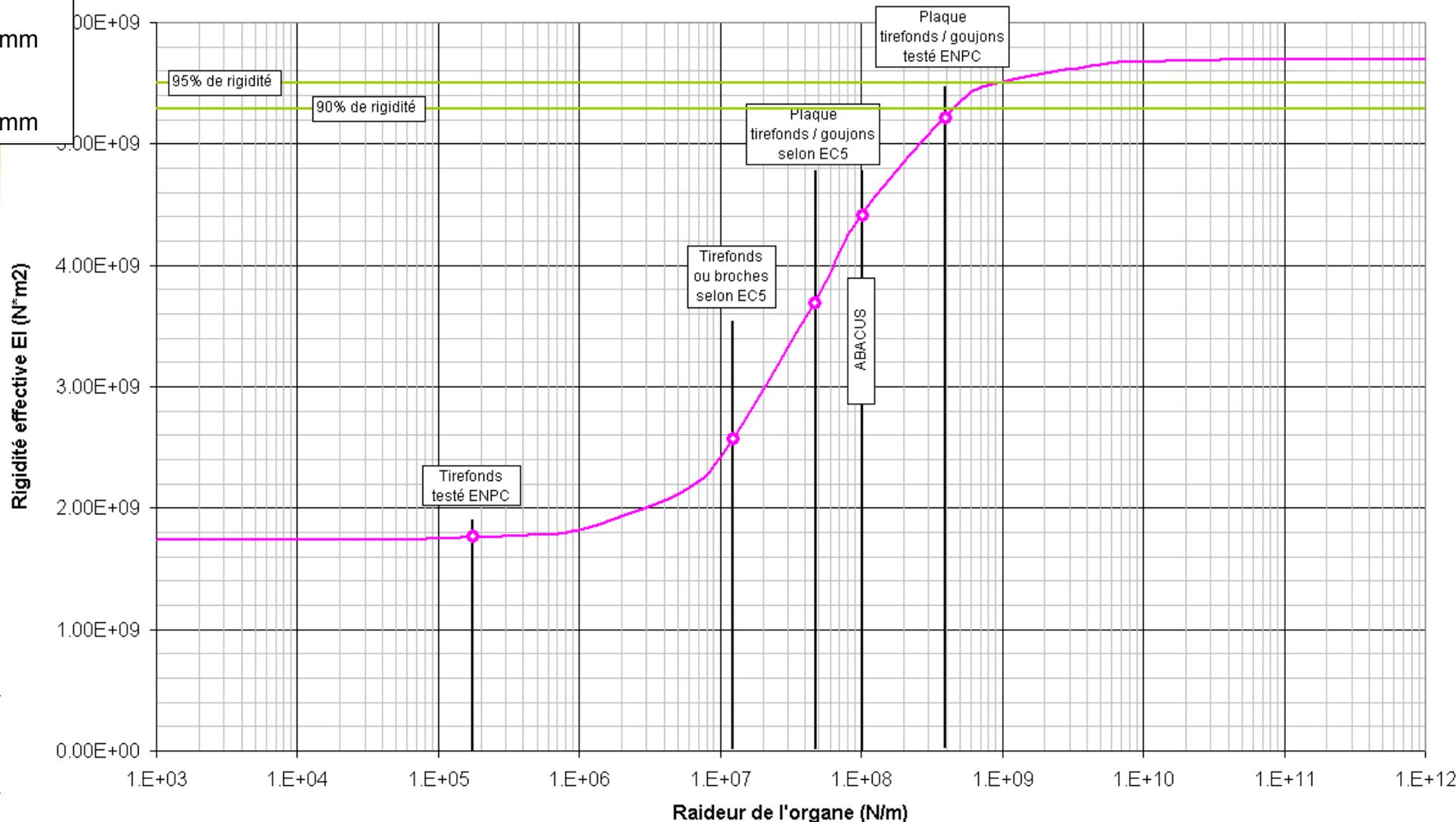
Poutre :
1200*480mm
Hourdis
220*1000mm



Connexion poutre / hourdis BA

Rigidité effective $E \cdot I$ d'une poutre mixte selon la méthode de Heimeshoff

Poutre :
1680*340mm
Hourdis
220*1500mm



Connexion poutre / hourdis BA

Premières conclusions :

- Gain modeste de rigidité obtenue, en théorie, par les assemblages par tire-fond ou broches ;
- Le faible gain de rigidité obtenu par l'assemblage par tire-fond par l'ENPC ;
- **Le gain très intéressant obtenu par l'assemblage plaque + tire-fond/goujons => proche de la rigidité parfaite.**

Quid du collage :

- Des essais montrent d'excellents résultats en termes de rigidité ;
- Manque de retour d'expérience sur ces assemblages en ce qui concerne la durée de vie ;
- **La porte reste ouverte : envisager un ensemble platine collée, et tire-fond/goujons à ces extrémités ?**
- **Embrèvement et goujons collés : à tester...**

Connexion poutre / hourdis BFUP

Quid du collage :

- Des essais montrent d'excellents résultats en termes de rigidité ;
- Manque de retour d'expérience sur ces assemblages en ce qui concerne la durée de vie...
- Envisager les liaisons mécaniques entre la dalle BFUP (nervurée et préfabriquée) et les poutres GL ?

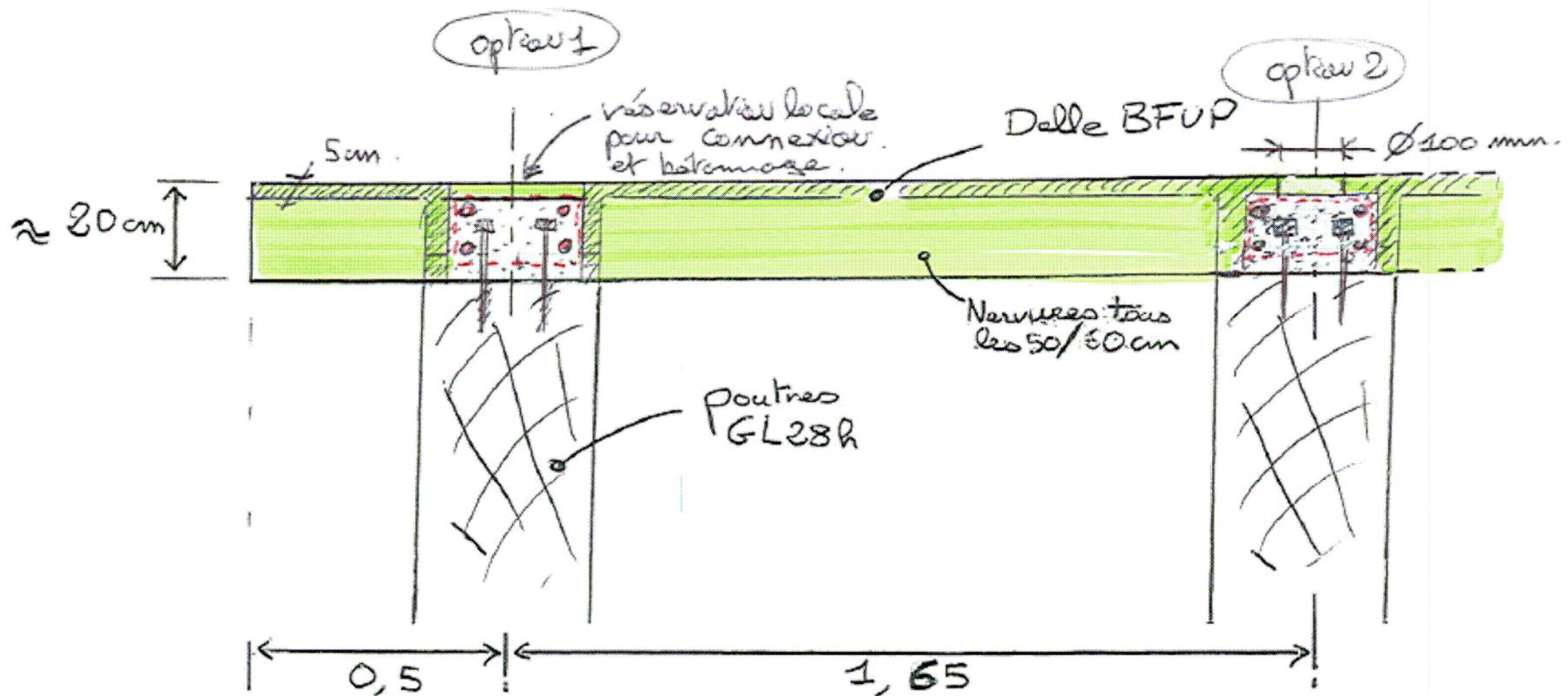
Connexion poutre / hourdis BFUP

Option 1 : dalle continue transversalement (pleine largeur)

Le clavage se fait entre la dalle et la poutre bois par le biais de fenêtres de bétonnage.

Largeur de plot : 2 mètres

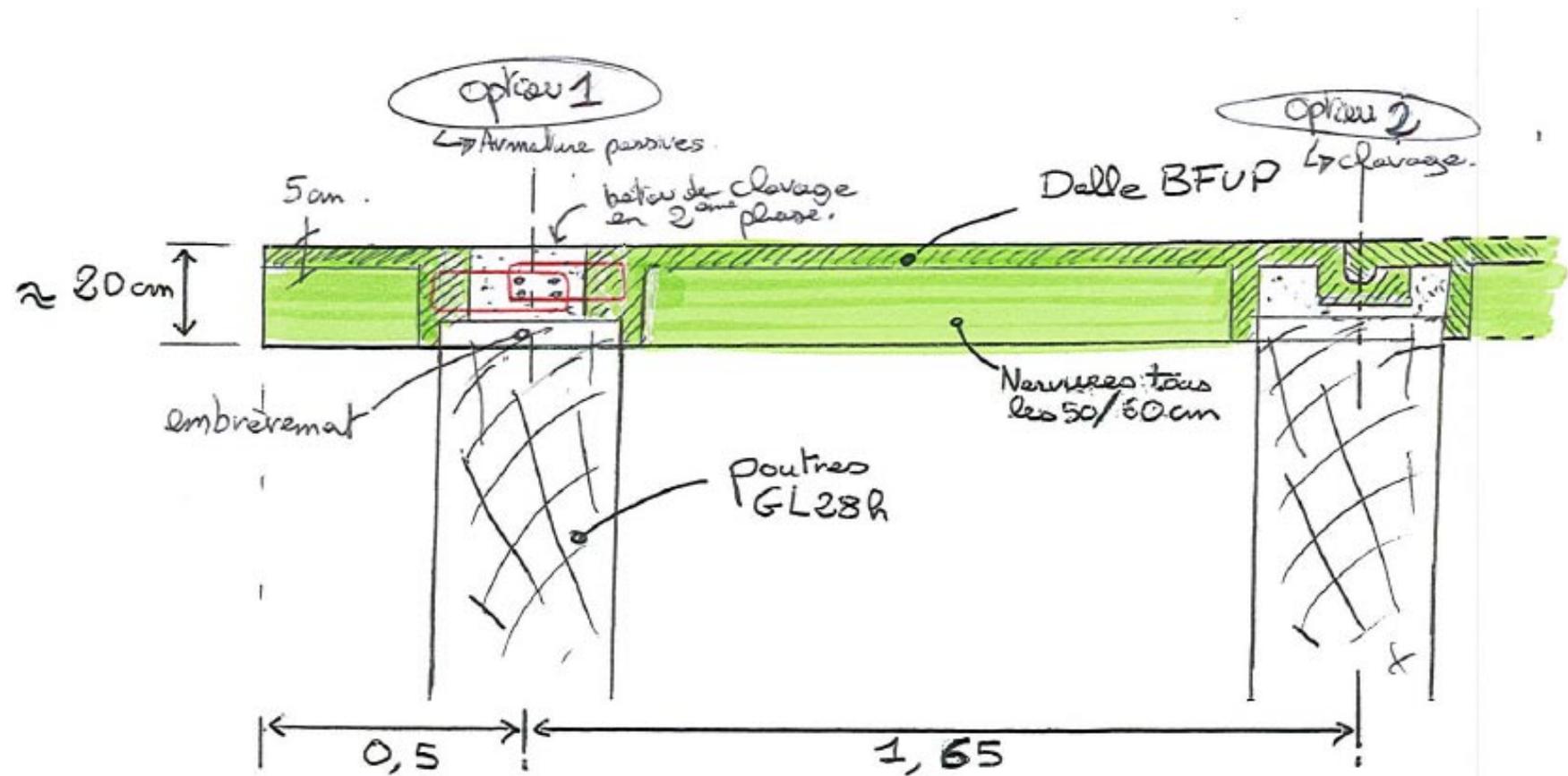
Clavage entre plots : par joint sec ou matage.



Connexion poutre / hourdis BFUP

Option 2 : dalle continue longitudinalement

Le clavage se fait par bétonnage, renforcé par un ferrailage transversal.



Entretoisement



Entretoisement des poutres

Rôle des pièces de pont courantes

En zone courante, pour les ponts à poutres multiples, les entretoises contribuent à la répartition des efforts entre les différentes poutres et permettent de transmettre les charges locales (poids de la dalle, des équipements, des surcharges, du vent) aux poutres porteuses.

Dans les ponts courbes, les poussées centrifuges et centripètes qui s'exercent dans les membrures courbes en plan induisent un moment de torsion dans le tablier. Ces efforts parasites sollicitent les éléments transversaux qui doivent être à même de les équilibrer.

Compte-tenu des portées de franchissement, de l'encastrement des poutres aux extrémités et de manière continue par la dalle, la solution adoptée ne comprend pas d'entretoises intermédiaires.

Entretoisement des poutres

Rôle des pièces de pont sur appuis

- . Assurer aux poutres porteuses un encastrement en torsion ;
- . Renforcer localement la dalle en offrant un appui solide aux poids lourds arrivant sur l'ouvrage ;
- . Diffuser les réactions d'appuis de vérinage et équilibrer les efforts de flexion induits, lorsque le vérinage est prévu sous la pièce de pont ;
- . Contribuer à la transmission des efforts horizontaux appliqués au tablier, principalement le vent, aux appuis.

Entretoisement d'about

Solution A1



Solution A1 :

Les entretoises sont réalisées à l'aide du même profilé utilisés pour les poutres principales. Des demis profilées métalliques sont employés pour l'assemble des entretoises aux poutres principales par l'intermédiaire de broches.

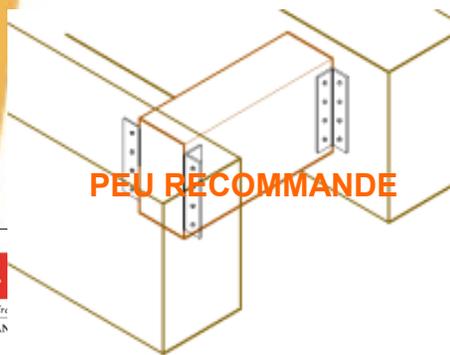
Solution A2



Solution A2 :

Cette solution est une variante de la solution précédente, mais les pièces métalliques d'assemblages présentent une géométrie simplifiée afin de réduire les coûts de fabrication.

Solution A3



Solution A3 :

Le principe est similaire à celui retenu sur le pont de Chavanon : il s'agit d'entretoises en bois assemblées par des cornières métalliques.

Entretoisement d'about

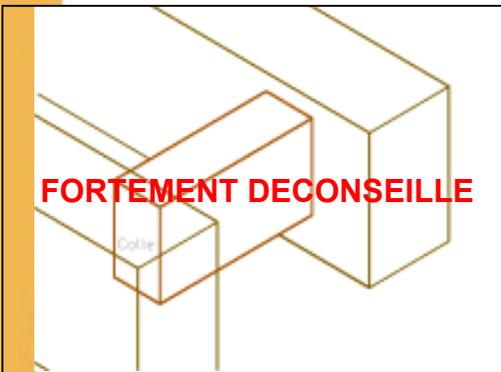
Solution A4



Solution A4 :

Cette solution est une alternative à la solution A3 en employant des cadres en forme de treillis plutôt que des poutres pleines, le but étant d'obtenir des pièces de pont plus légères en étant tout aussi robuste. L'assemblage aux poutres principales se fera par broches ou cornières.

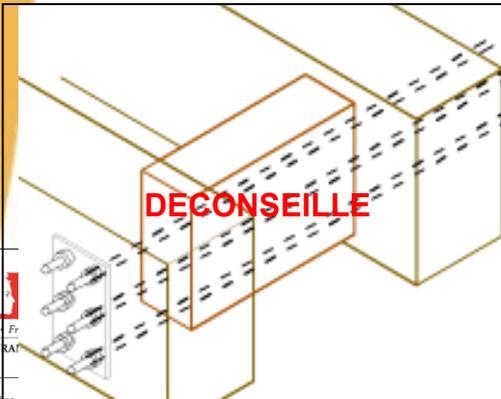
Solution A5



Solution A5 :

Il s'agit de proposer une alternative aux solutions précédentes en ayant recours au collage plutôt qu'un assemblage mécanique.

Solution A6



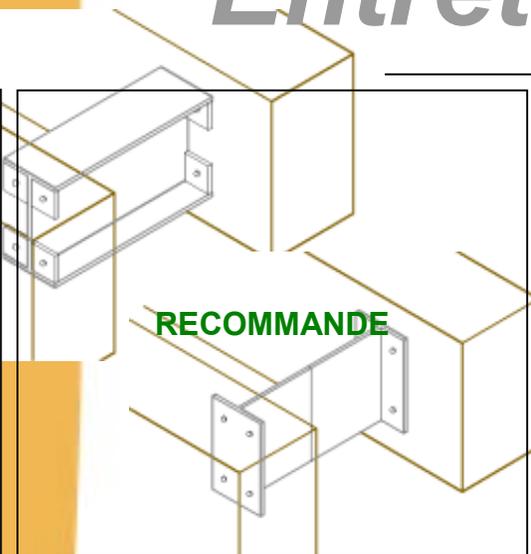
Solution A6 :

Il s'agit de proposer une alternative à la solution A5 en ayant recours à des tiges d'ancrages pour maintenir toutes les entretoises.

Entretoisement

Pièces de pont en métal

Solution B1



Solution B1 :

L'entretroise est constituée d'un profilé en I ou en H du commerce. Des platines sont soudés à l'entretroise pour l'assemblage par vis ou par broches.

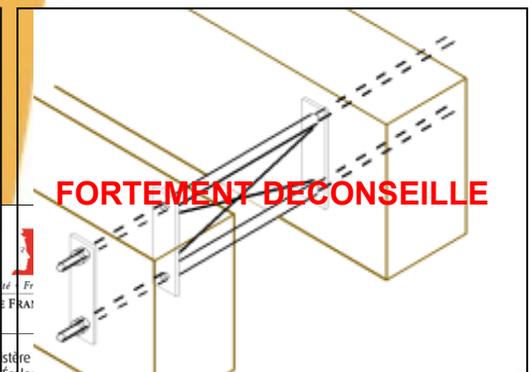
Solution B2



Solution B2 :

L'entretroise est constituée d'un cadre métallique avec une croix de St-André. L'ensemble paraît être monté à l'aide de vis ou de broches.

Solution B3



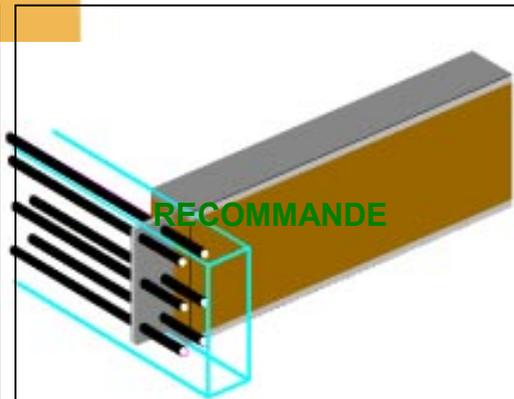
Solution B3 :

Ce sont des cadres métalliques constitués de tubes (creux) et d'une croix de St André. Des barres précontraintes traversent l'ensemble des poutres et des entretoises et maintiennent le tout.

Entretoisement

Pièces de pont en béton

Solution C1



Solution C1 :

Les profilés métalliques des poutres sont prolongés au-delà de l'about. Une poutre béton relie l'ensemble des poutres principales en bois. Cette poutre sera ancrée au tablier par des cadres en attente.

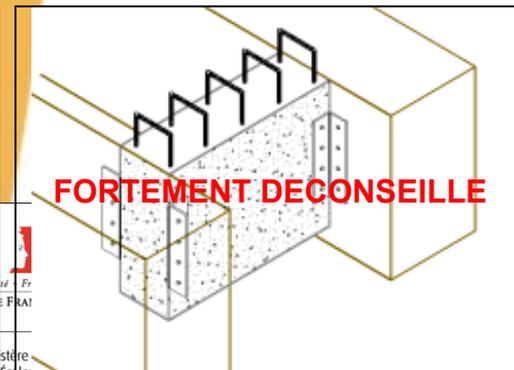
Solution C2



Solution C2 :

Cette solution est une alternative à la solution C1 en employant des tôles métalliques goujonnées pour réaliser la liaison de chaque poutre bois à la poutre béton.

Solution C3



Solution C3 :

Une entretoise en béton reliera les poutres principales en bois. Chaque poutre sera ancrée au tablier par des cadres en attente.

Entretoisement

Pièces de pont mixte bois-métal

Solution D1



Solution D2



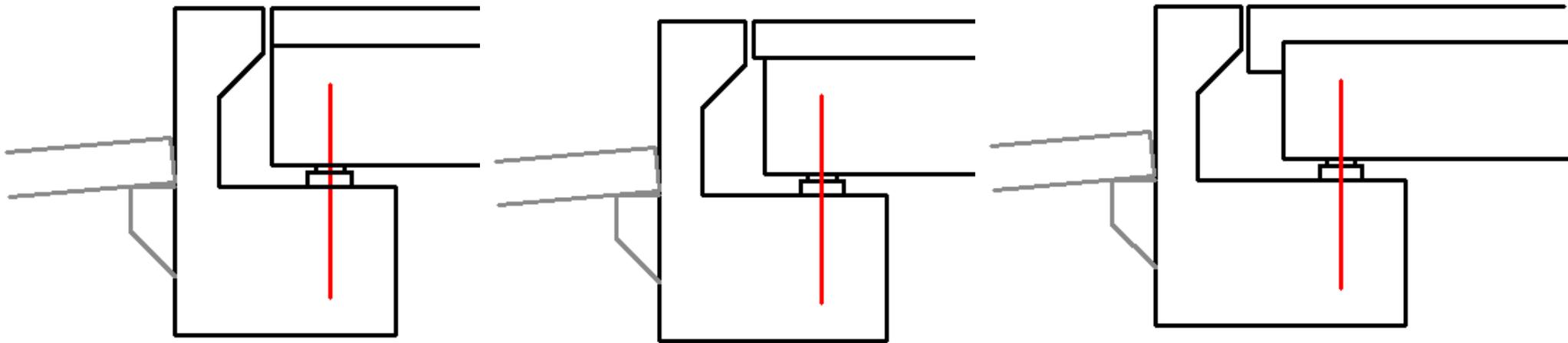
Solution D1 et D2 :

Ces solutions reprennent les principes que l'on peut voir sur les ponts de Crest et d'Avoudrey. Ce sont des entretoise en treillis mixte bois-métal munies de fixation par platines avec vis ou broches en métal.

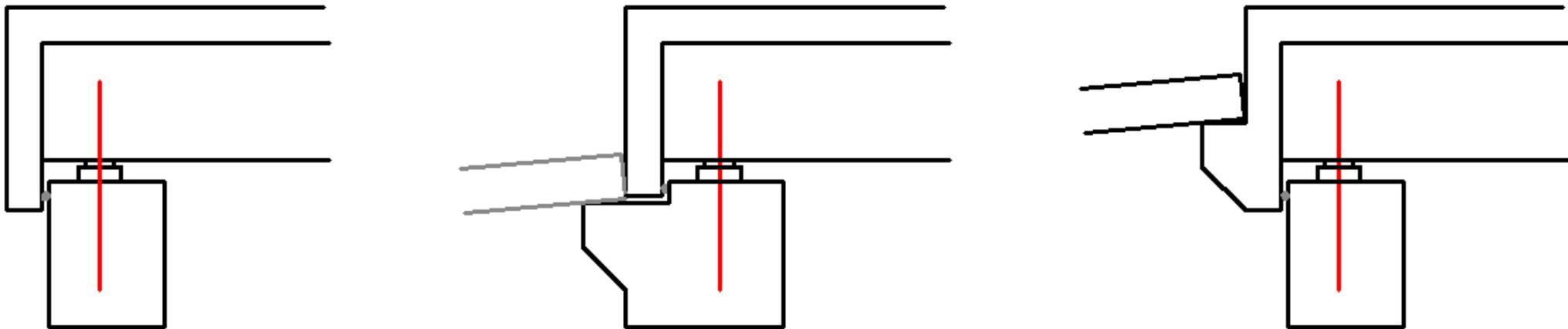
Traitement des abouts

Protection des abouts contre l'humidité

Protection des poutres par simple avancée de la dalle => joint de chaussée

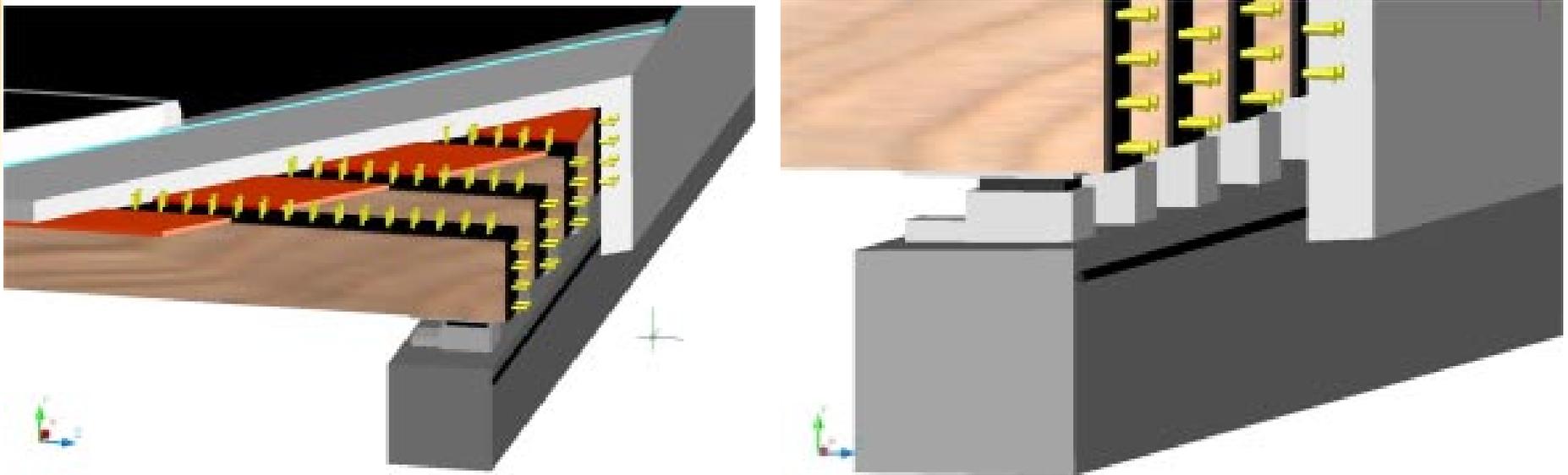


Protection des poutres par retombée de dalle => pont semi-intégral



Traitement des abouts

Conception adoptée pour les pièces de pont du pont à poutres bois/béton



Les raisons de ce choix sont multiples, car elles permettent :

- De simplifier les assemblages entre les poutres porteuses et les pièces de pont ;
- D'éviter l'emploi de joints de chaussée ;
- D'assurer aux poutres porteuses une bonne protection vis-à-vis d'éventuelles venues d'eau.

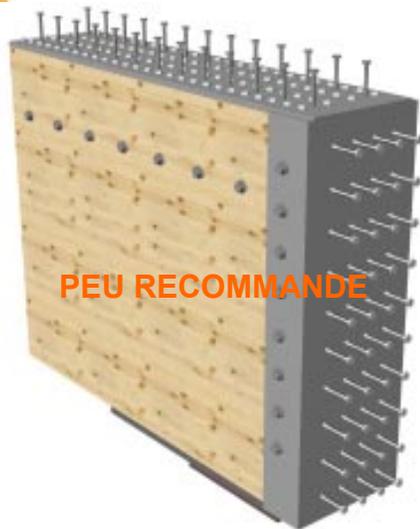
Traitement des abouts

Solution 1



La platine verticale supportant les goujons est visée sur les âmes des poutres principales. Ce principe est simple de réalisation, la plaque goujonnée peut être faite d'un seul tenant ou découpée en plusieurs modules élémentaires.

Solution 2



Dans ce cas, la plaque goujonnée présente la forme d'un U. Les ailes du U permettent cette fois de lier la plaque par les parois latérales des poutres principales.

Il est possible de réaliser des trous oblongs dans le sens vertical, afin de limiter la transmission au bois d'efforts perpendiculaire au sens des fibres qui pourraient être préjudiciable pour les poutres.

Traitement des abouts

Solution 3



La liaison se fait par deux cornières disposées de part et d'autre des poutres. Ainsi, les problèmes d'ajustement entre les pièces disparaissent ainsi que les problèmes d'efforts parasites dans les vis d'assemblages.

Solution 4



La liaison entre les poutres principales et la retombée de dalle liaison se fait par l'intermédiaire de demi-profilés en I.

Traitement des abouts

Solution 5



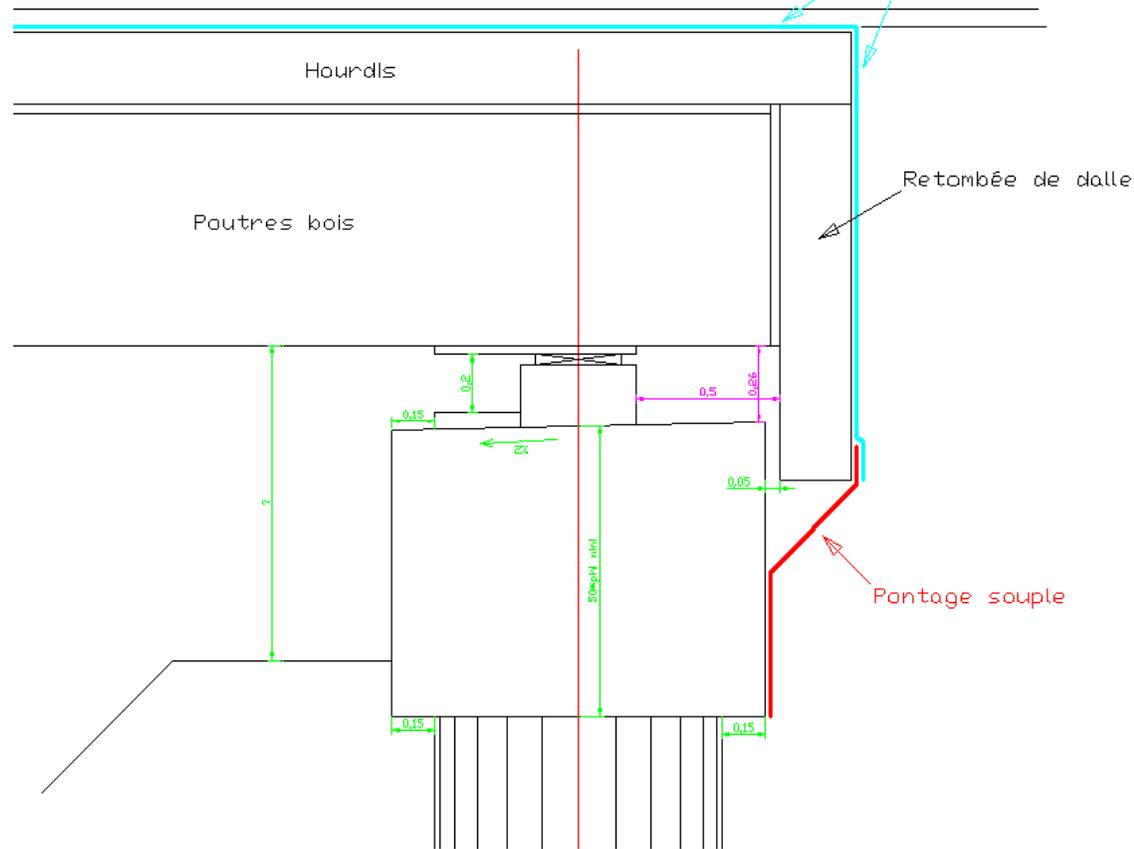
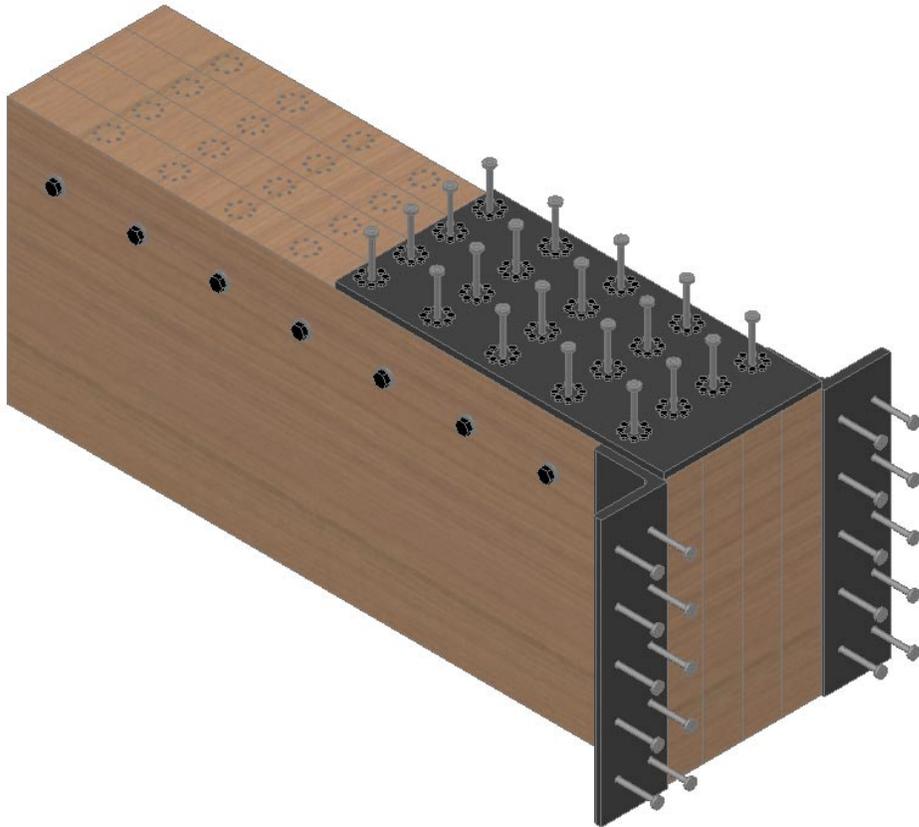
Il s'agit là d'une variante de la solution 4 : l'âme des profilés est prolongée, en about, au-delà des poutres en bois et viennent pénétrer dans le béton de la retombée de dalle.

Traitement des abouts

Conception d'ensemble de la zone d'about : Solution retenue par le CETE

La conception générale retenue pour la zone d'about est celle d'un pont semi-intégral :

Étanchéité et sa retombée



Continuité sur piles

Continuité sur piles

1 travée :

■ Cas 4 : charge uniformément répartie

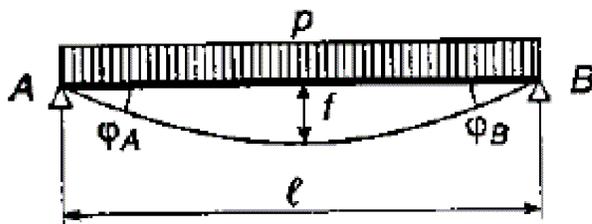


Fig. 24

$$R_A = R_B = \frac{p\ell}{2} = \frac{P}{2}$$

$$V = p \left(\frac{\ell}{2} - x \right)$$

$$M = \frac{px(\ell - x)}{2}$$

$$M_{\max} = \frac{p\ell^2}{8} = \frac{P\ell}{8} \quad \text{pour } x = \frac{\ell}{2}$$

Moment dimensionnant à mi-travée :

Pleine participation de la dalle à la reprise des efforts

Calcul en section mixte : gain sur le volume

2 travées :

■ Cas 1 : deux travées égales

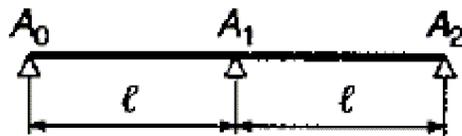


Fig. 37

$$M_{\max} = \frac{p\ell^2}{14,3} + \frac{s\ell^2}{10,5}$$

$$M_{1\min} = -\frac{(p+s)\ell^2}{8}$$

Moment dimensionnant sur appuis :

Pas de participation de la dalle puisque fissurée

Calcul en « bois seul » : augmentation du volume de bois

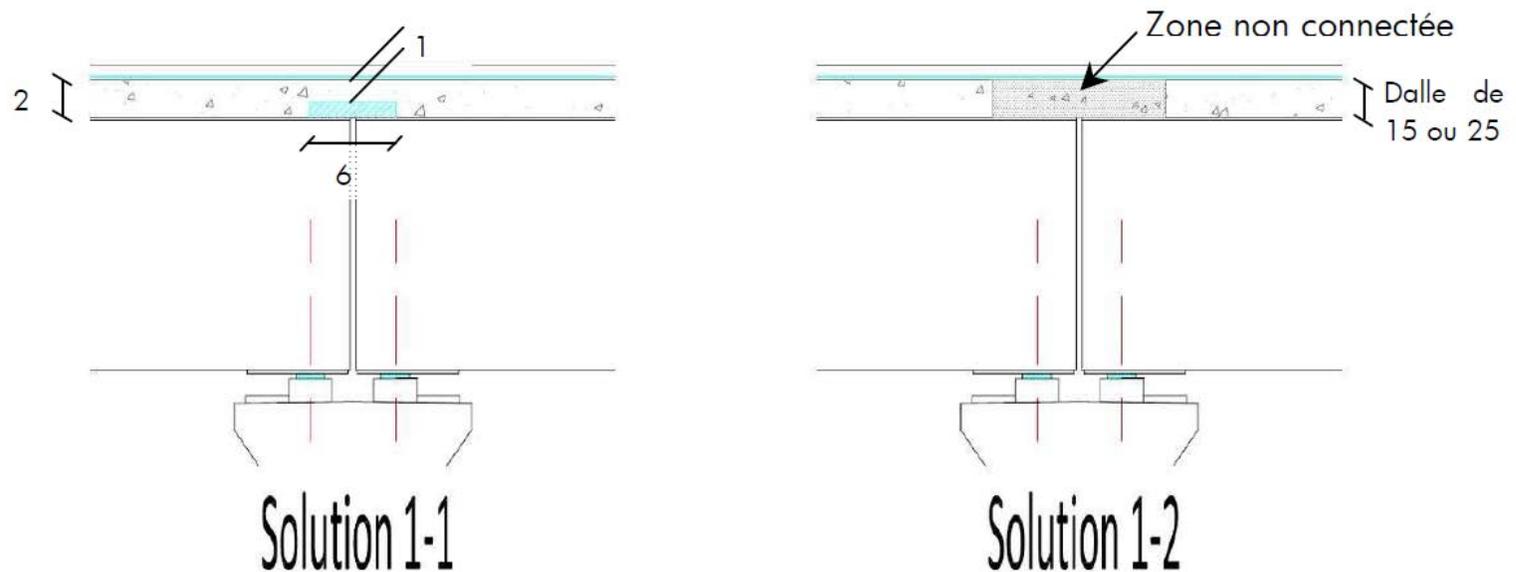
Recherches de solutions en cours ;

Possibilité : continuité par travée iso (type VIPP, PRAD...)

Continuité sur piles

▪ Système à « entretoises »

Le système d'encastrement en torsion sur pile est assuré par des entretoises entre chaque poutre en bois dans l'alignement des appuis. Pour une raison de rigidité, ces entretoises seront en métal (profilée en I) ou en béton. Ces entretoises seront liaisonnées aux poutres par l'intermédiaire de connecteurs type tire-fonds et à la dalle par des goujons.

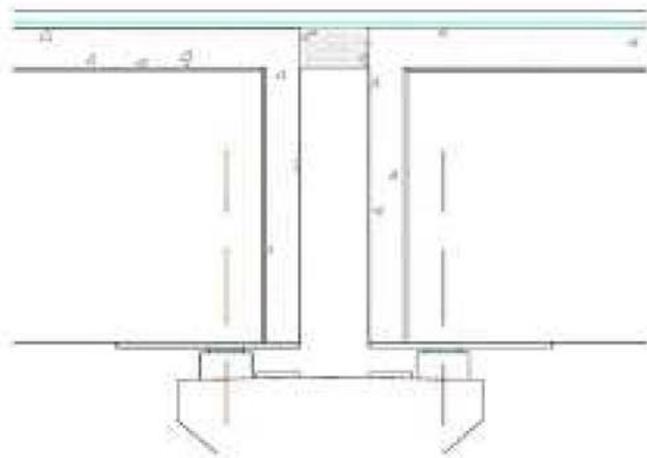


- **Solution 1-1** : Section rétrécie de la dalle par un coffrage résistant et du polystyrène ;
- **Solution 1-2** : Continuité du hourdis par une partie de dalle non connectée aux poutres en bois. Le maintien est assuré par le ferrailage longitudinal.

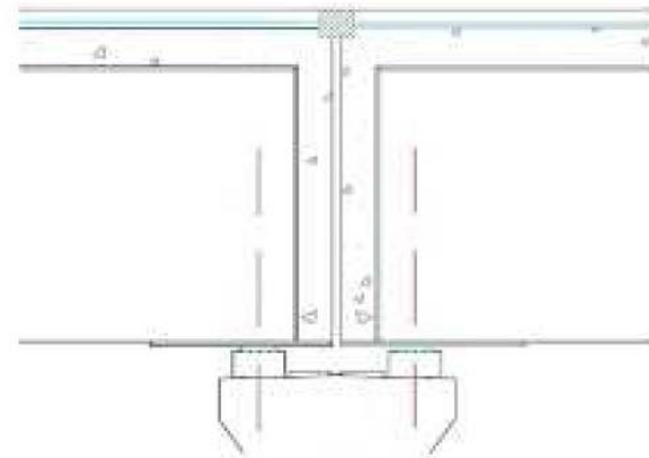
Continuité sur piles

▪ Système à « retombée de dalle »

Le système d'encastrement en torsion sur pile est assuré de la même manière que sur culées par un système d'about de pont semi-intégral.



Solution 2-1



Solution 2-2

- **Solution 2-1** : Continuité de la dalle par une dalle de transition. Le maintien est assuré par le ferrailage longitudinal ;
- **Solution 2-2** : Mise en place d'un joint de chaussée.

Frettage sur appuis

Frettages sur appuis

Le bois travaille mal en compression transversale ce qui limite l'intensité des efforts que l'on peut transmettre :

$$f_{c,90,g,k}(GL28) = 3,0 \text{ MPa}$$

Les limites admissibles sous charges permanentes et en service sont ainsi très faibles :

$$f_{c,90}(CP) = 3,0 * 0.6 / 1.25 = 1.44 \text{ MPa}$$

$$f_{c,90}(CP + S) = 3,0 * 0.9 / 1.25 = 2.16 \text{ MPa}$$

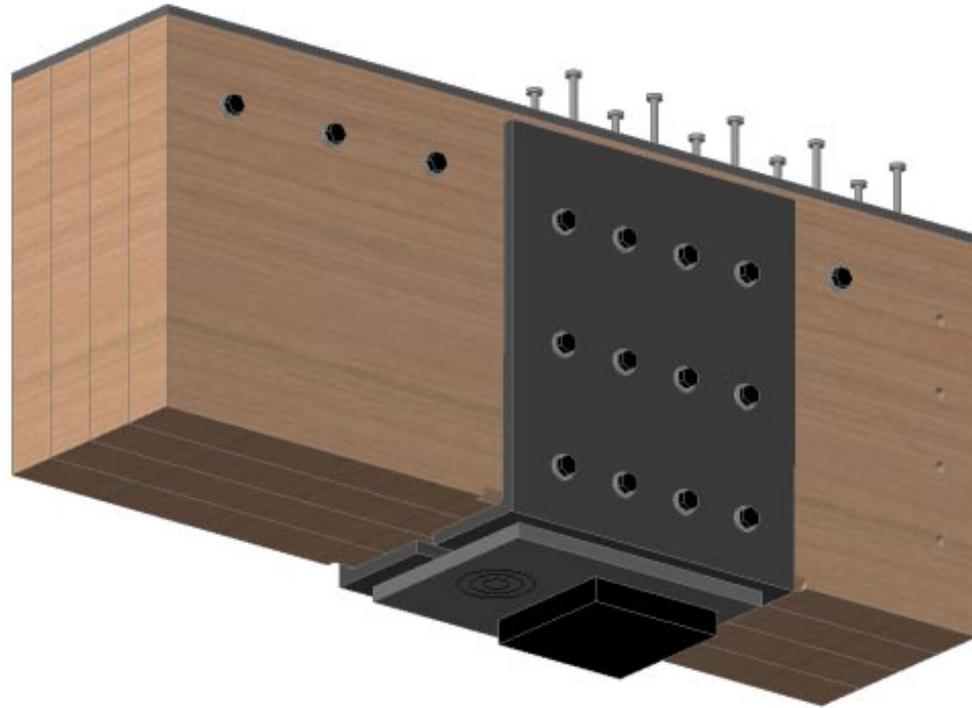
En comparaison, les élastomères frettés acceptent des contraintes plus importantes (cf Guide SETRA : Appareils d'appuis en élastomères frettés) :

$$f_c(CP) = 3.00 \text{ MPa}$$

$$f_c(CP + S) = \text{entre 20 et 25 MPa}$$

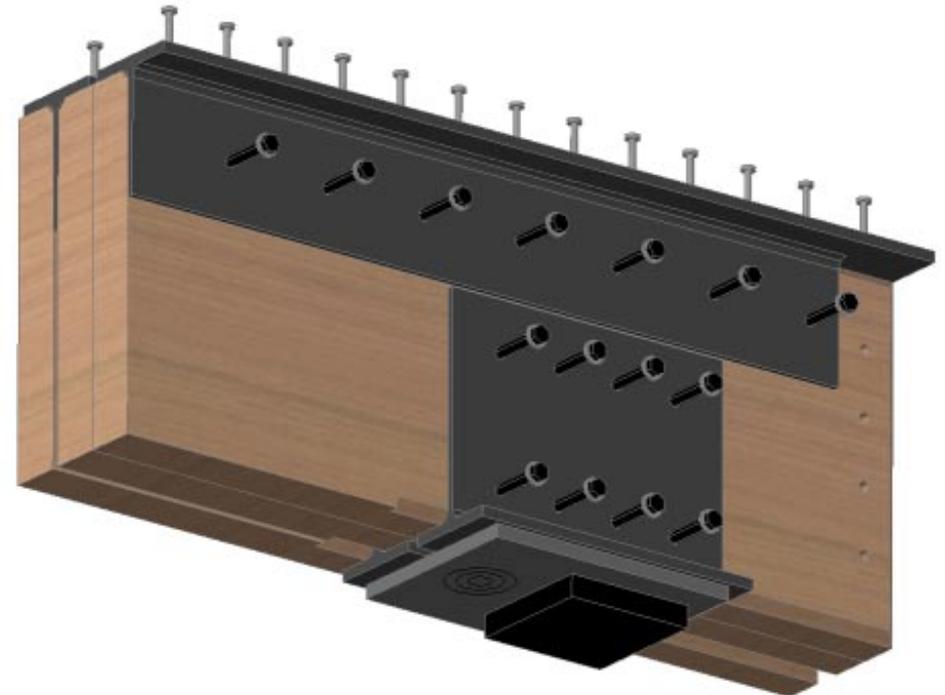
Il semble nécessaire de renforcer localement les poutres en bois par des frettages chargés de reprendre à eux seuls la réaction d'appuis et de la répartir sur la hauteur de la poutre.

Frettages sur appuis



La solution consiste à transmettre au bois la réaction d'appui par l'intermédiaire de plaques métalliques.

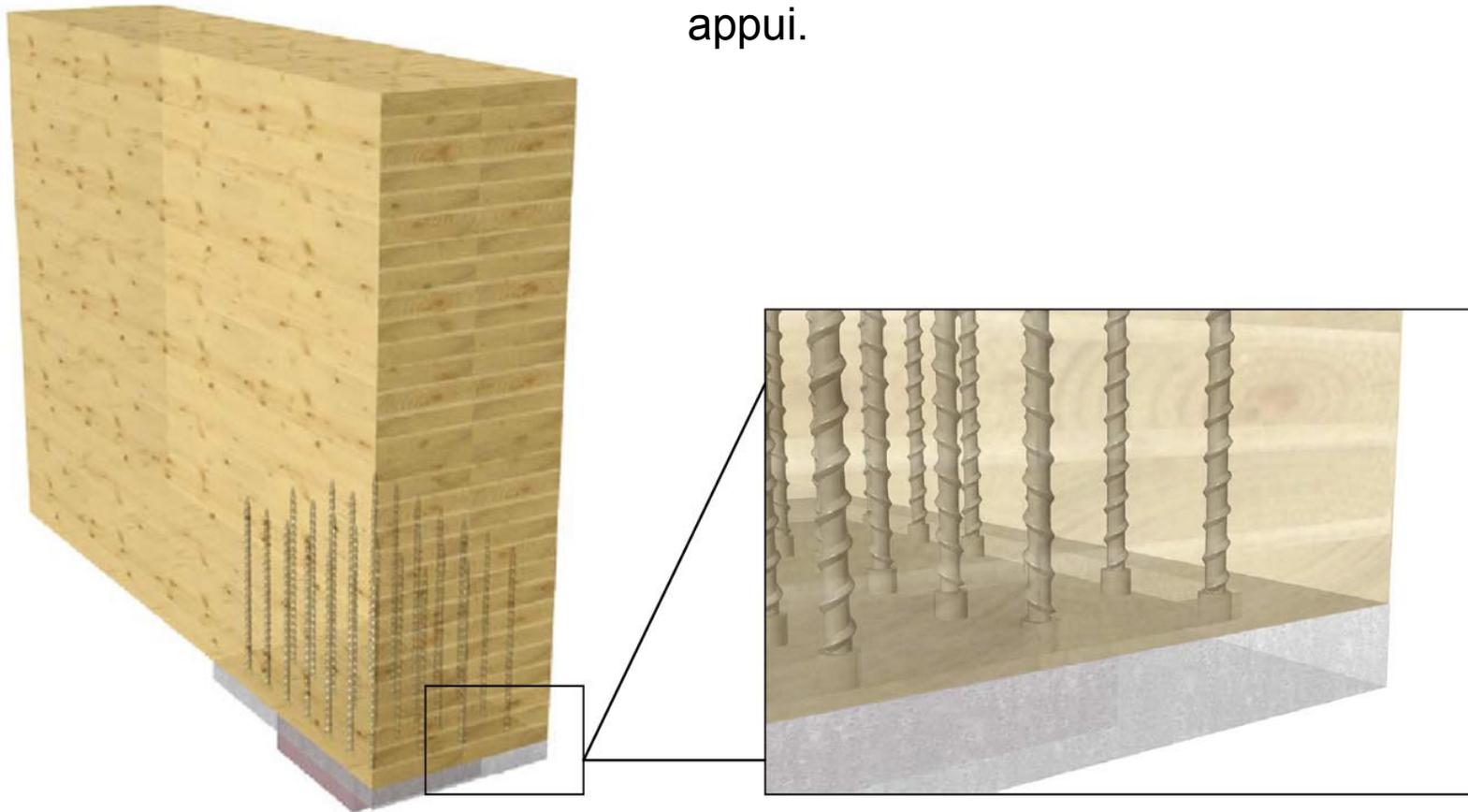
La transmission de l'effort se fait conjointement par frottement bois/béton et par les organes d'assemblage.



Solution à l'étude pour déterminer la faisabilité : surface de la zone de contact, nombres d'organes d'assemblage...

Frettages sur appuis

La solution consiste à renforcer la poutre bois à l'aide d'un frettage type WB de SFS qui transmettra les efforts sur la hauteur de la poutre et assurera la pérennité de la poutre sur appui.



Merci de votre attention

