



Cerema

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

Reconstruction du pont sur l'Orne à Boncourt



Laurent LOUTTE – Cerema Est / Division Ouvrage d'Art

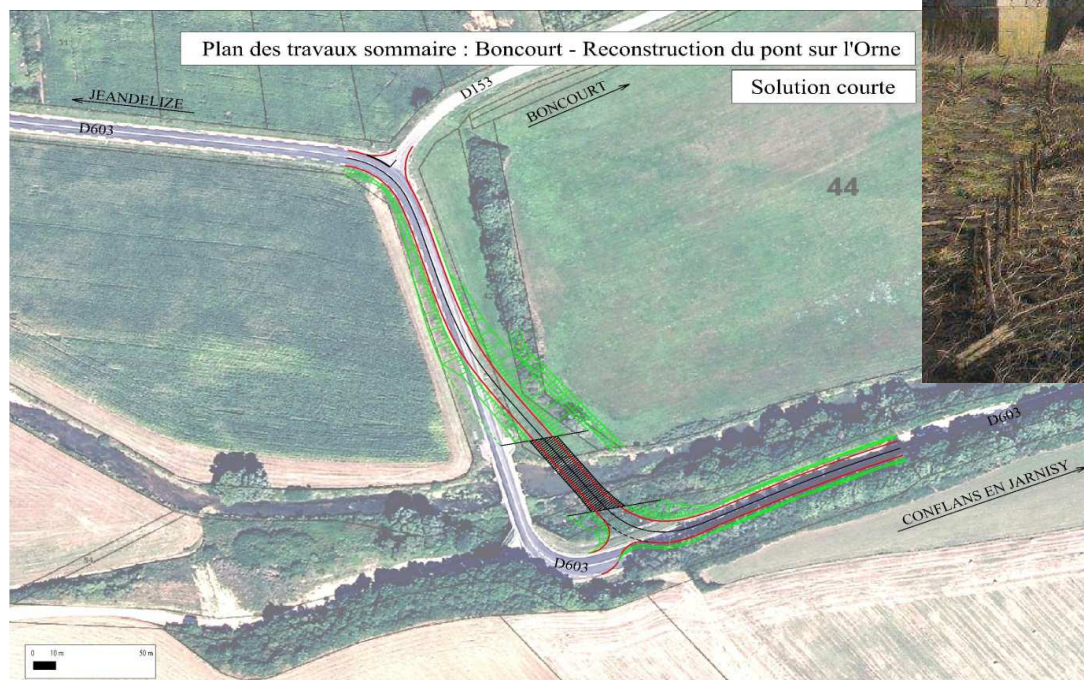
Cerema Est

28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt

Présentation de l'ouvrage

Pont existant à 3 arches en maçonneries de 8,10m, 9,90m et 12,30m d'ouverture :



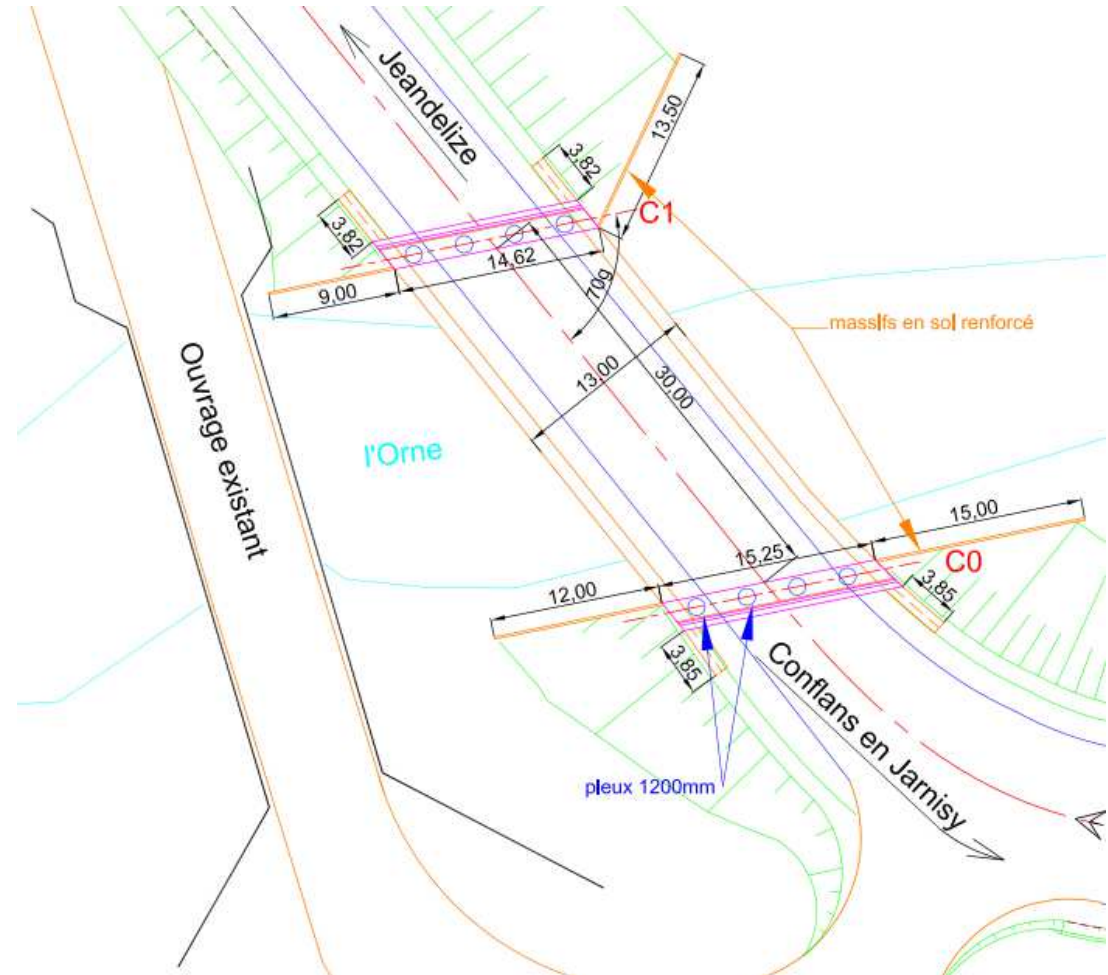
Franchissement de l'Orne
à angle droit
→ amélioration du tracé

28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt

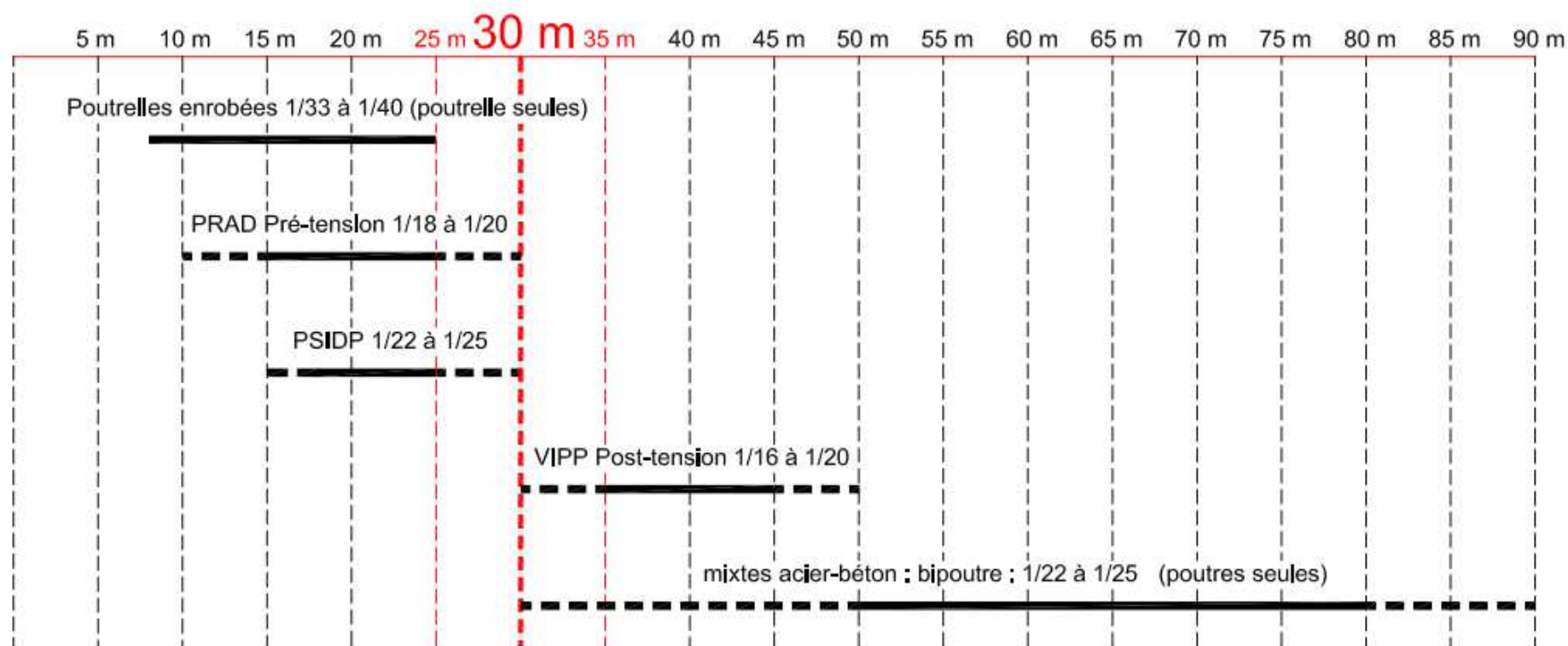
Présentation de l'ouvrage

- Franchissement en 1 travée
- Biais : 70 grades
- Ouverture biaise = 30m
- Largeur tablier = 13m
(dont chaussée de 11m)
- Murs en ailes en sol renforcé
- Proximité de l'ouvrage de franchissement existant



Problématique des ouvrages de portée moyenne

Gamme de portées 25 à 35 m : Structures courantes :



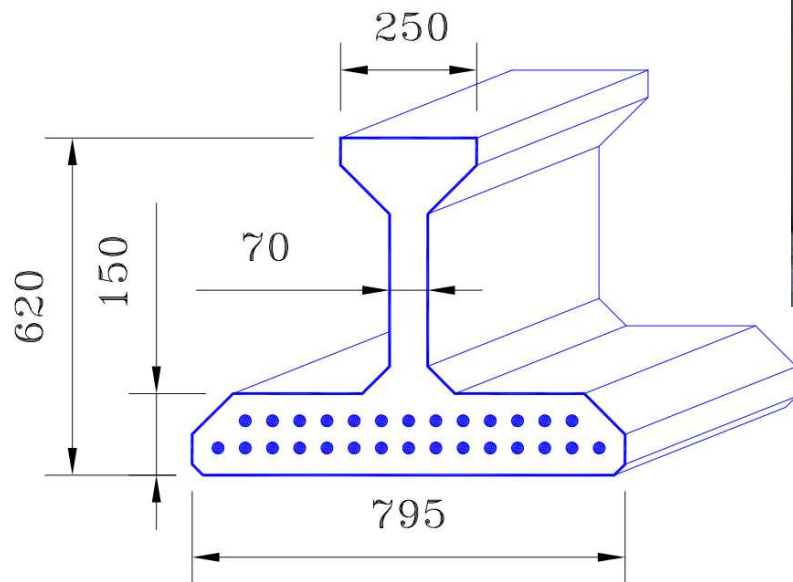
Solutions BFUP

Pont PINEL réalisé par EIFFAGE à Rouen (2006) : portée biaise = 26,70 m

Largeur droite : 14 m

Tablier à 17 poutres jointives

28 torons T15S



Elancement des poutres : 1/43

Elancement du tablier : 1/31

Solutions BFUP

Intérêt du BFUP : Béton Fibré Ultra Performant

- Fortes résistances :
 - limite en compression $f_{ck} > 130-150$ MPa
 - limite en traction $f_{ctk,el} < -6$ MPa(pas suffisant pour se passer d'armatures)
- Apport des fibres :
 - Rendre le béton plus ductile en compression et en traction (moins de fragilité en compression qu'un BHP ou un BUP)
 - S'affranchir de l'usage d'armatures passives

Le BFUP est particulièrement adapté à la précontrainte :

- Il accepte des fortes compressions,
- Peu ou pas d'armatures de fretage grâce à sa résistance en traction.

Bonnes pratiques pour un pont :

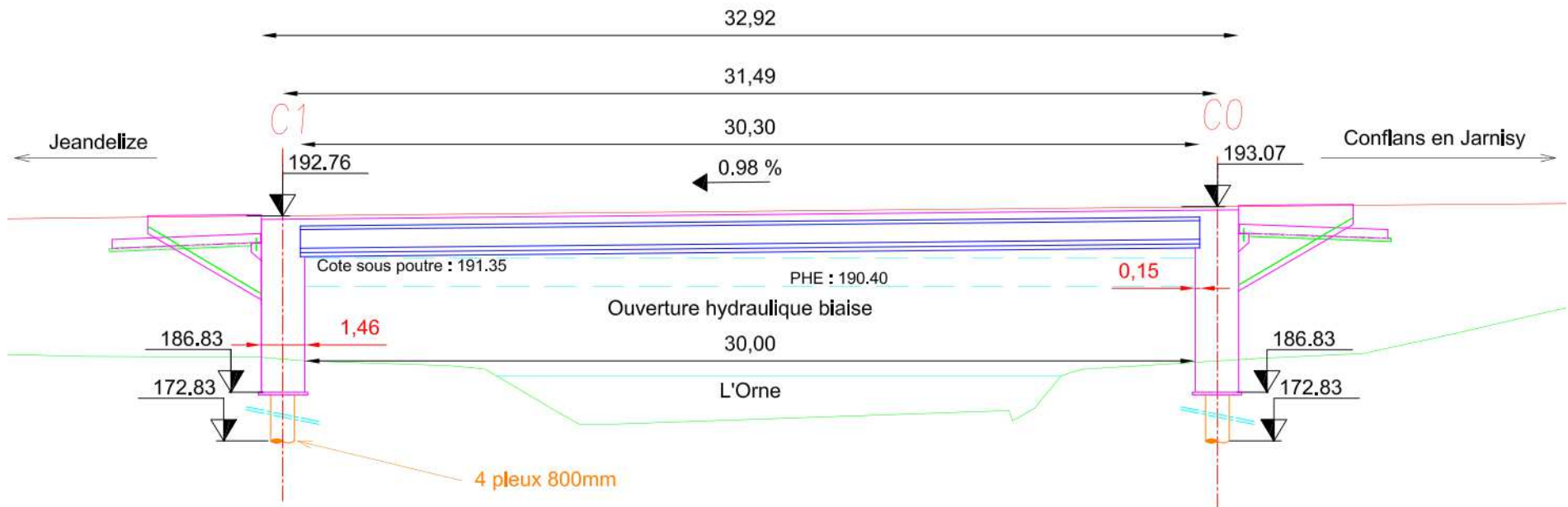
- Précontrainte pour la flexion longitudinale
- Fibres pour remplacer les armatures d'effort tranchant et de diffusion

Solutions BFUP

Variante n°1 : Piédroits épaisseur 1,30m (1,46m biais)

Longueur des poutres : 30,30m (repos 15 cm biais)

Pieux : 4 Φ 800 par appui



28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt

 Cerema

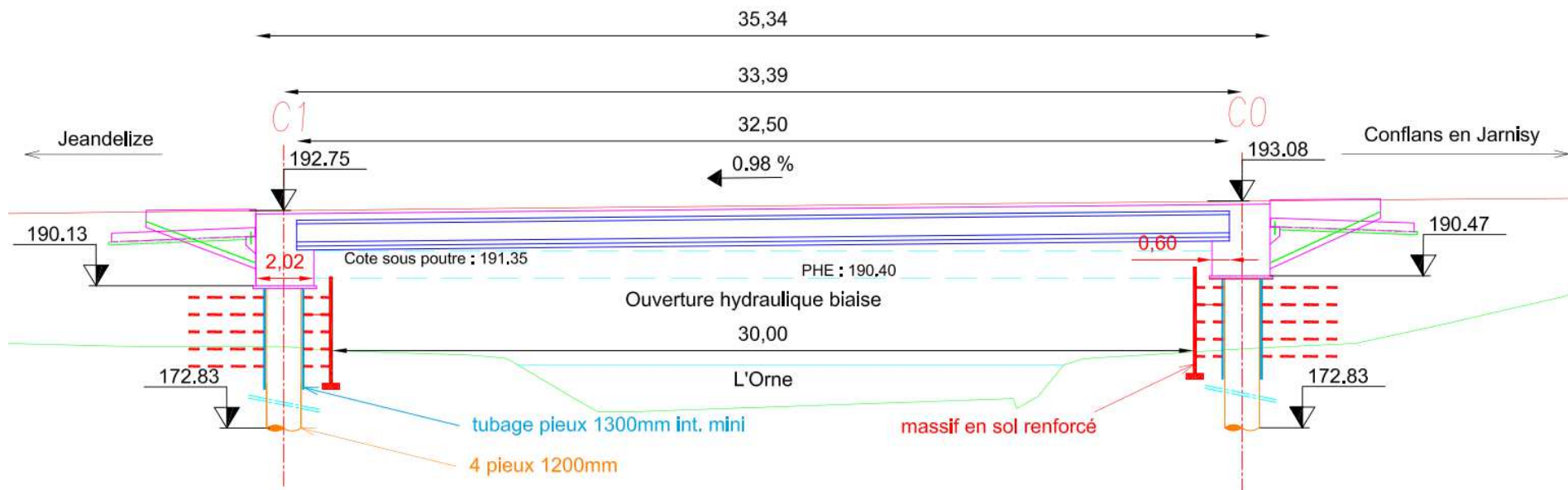
Solutions BFUP

Variante n°2 : Chevêtres épaisseur 1,80m (2,02m biais)

Longueur des poutres : 32,50m (repos 60 cm biais)

Pieux : 4 Φ 1200 par appui avec tubage Φ 1300 int.

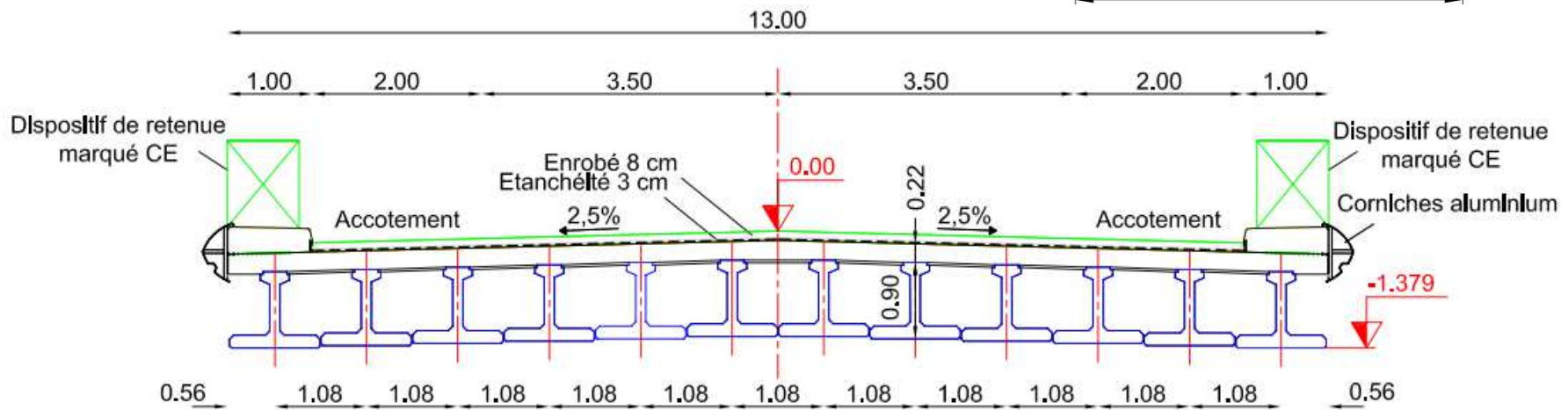
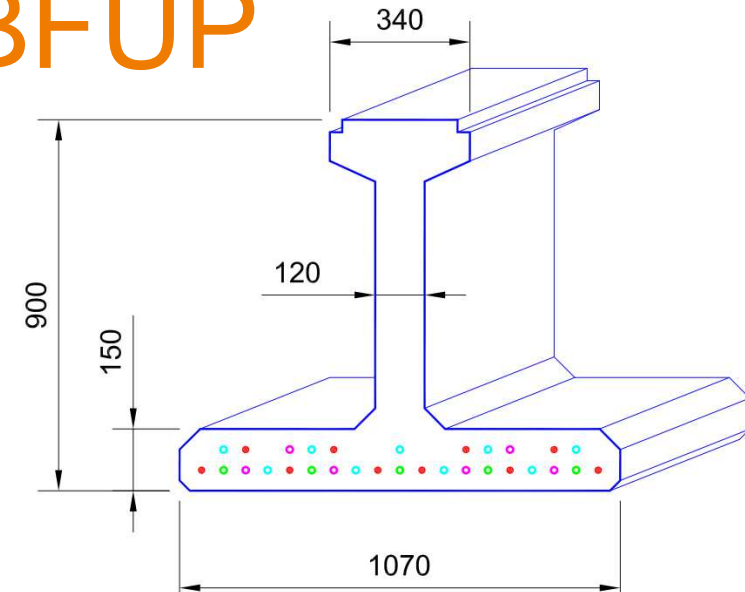
Massifs en sol renforcé prolongé sous tablier



Solutions BFUP

Coupe transversale :

Tablier à 14 poutres jointives



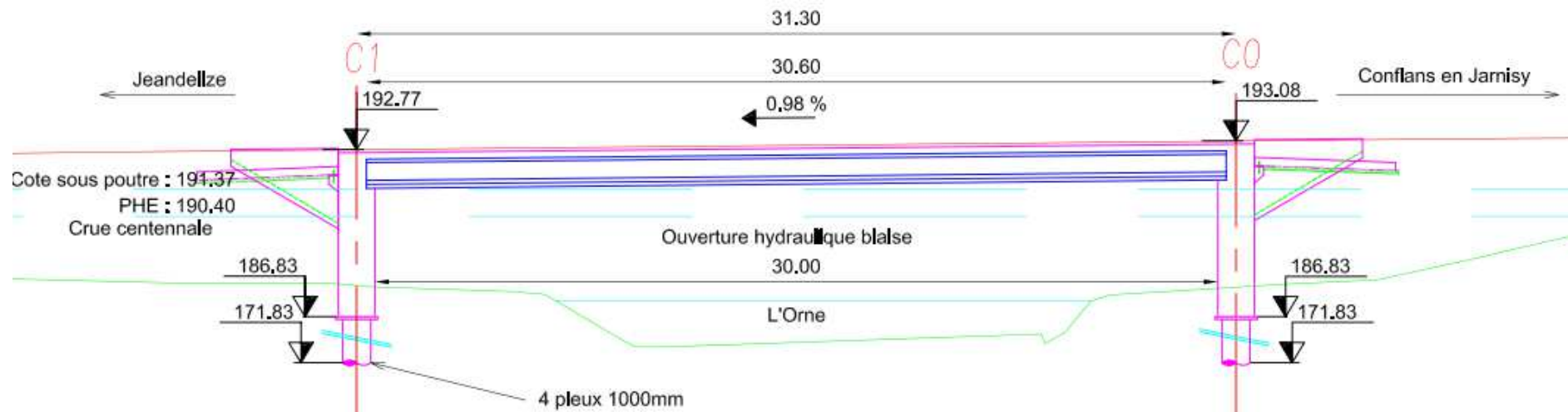
Solutions BFUP

Les 2 variantes sont techniquement acceptables.

Petite incertitude vis-à-vis des diamètres définitifs des fondations avec des pieux fortement ferrillés (ratio aciers > 1,6% de la section de béton).

L'augmentation éventuelle du diamètre est moins contraignante pour la variante n°1 qui est privilégiée.

Pont intégral en poutres ITE® : variante n°1 (version finale) :

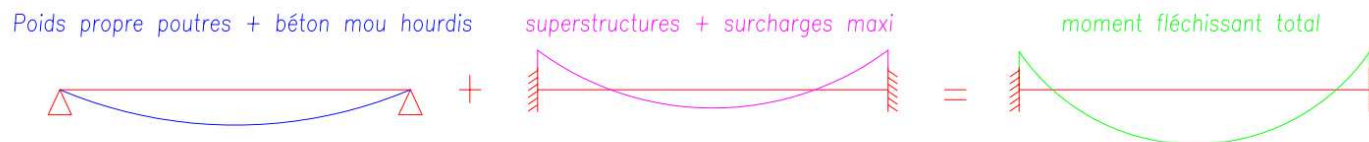


Solutions BFUP

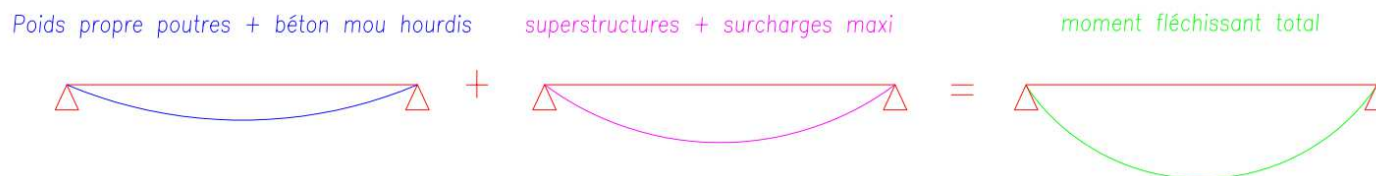
Conditions de dimensionnement proposées :

- Justification du tablier en modèle « hyperstatique » et « isostatique » :

« hyperstatique » :



« isostatique » :



- Calcul en fourchette type PIPO pour la poussée des terres ($K_a=0.25$ et 0.5)

- Traitement des encastremements :

- Frettage des piédroits sous les zones de repos des poutres du fait de l'absence de goussets pour faciliter la transmission des efforts
- Recouvrements alternés pour les aciers extérieurs tendus

Les études d'exécution

Hypothèses et règlements de calcul (BFUP) :

- Les poutres sont justifiées selon les recommandations BFUP de l'AFGC de Juin 2013.
- Les études d'exécution ont été réalisées alors que les normes NF P 18-470 et NF P 18-710 arrivaient à la fin de leur processus d'élaboration. Elles ont permis de compléter le guide sur certains points particuliers, comme les longueurs d'ancrage et de recouvrement ou la non-fragilité.

Modèle de calculs :

- Modélisation ST1 2D avec phasage,
- Calculs avec modèle 3D aux éléments finis pour le ferrailage transversal de la dalle (mesure des effets de la torsion induite par le biais), les murs en retour...

Prise en compte des fibres dans les calculs (Coefficient d'orientation des fibres) :

$K = 1,35$ pour justifications globales et $K=1,75$ pour justifications locales.

(déterminé par les études de convenance)

Les études d'exécution

Carte d'identité du BSI :

Elle évite de refaire systématiquement tous les essais permettant de définir les caractéristiques dont on a besoin pour les calculs comme f_{ck} , E_{cm} , comportement en traction, lois de fluage et de retrait, comportement au feu.

Principales caractéristiques :

$f_{ck} = 160 \text{ MPa}$

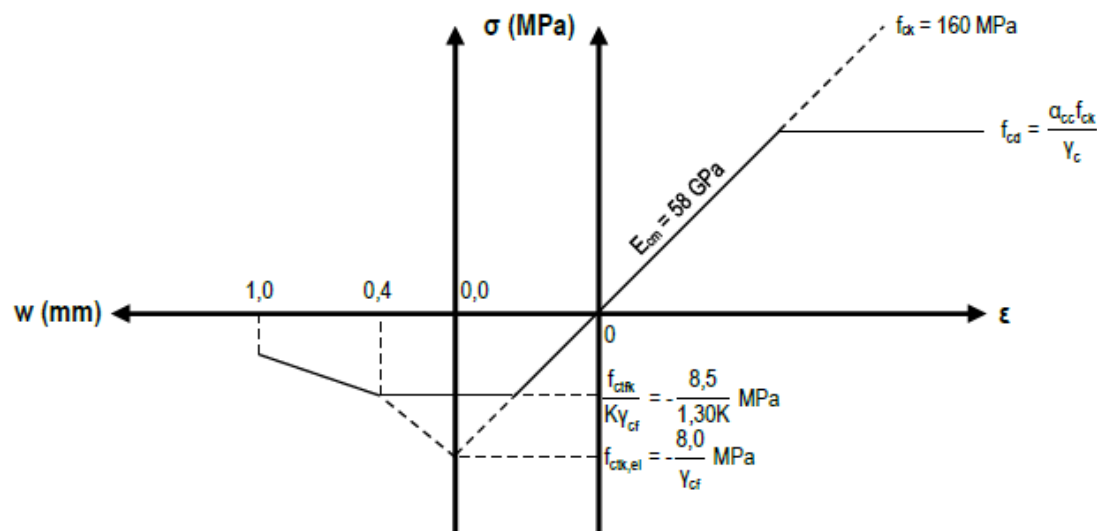
$f_{ctk,el} = -8 \text{ MPa}$

$E_{cm} = 58\,000 \text{ MPa}$

Poids volumique = $27,5 \text{ kN/m}^3$

Longueur des fibres = 2 cm

Loi de comportement ELU :



Les études d'exécution

Justification du tablier – Contraintes normales :

La précontrainte est dimensionnée pour compenser la flèche finale sous charges permanentes (pas de contreflèche du banc de fabrication)

V.3.1.1. A la mise en tension (charges permanentes nominales et précontrainte)

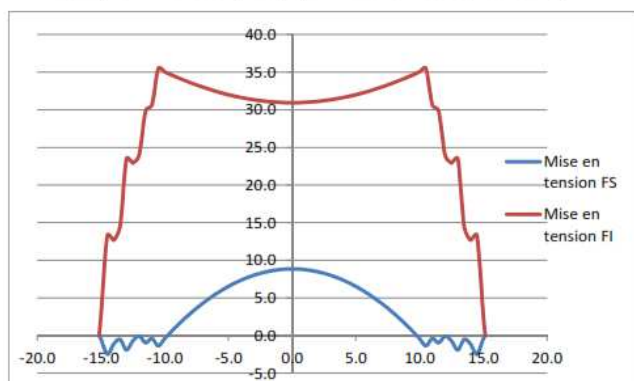


Diagramme des Contraintes Etat 2 du modèle ST1

V.3.1.4. Enveloppe ELS caractéristiques

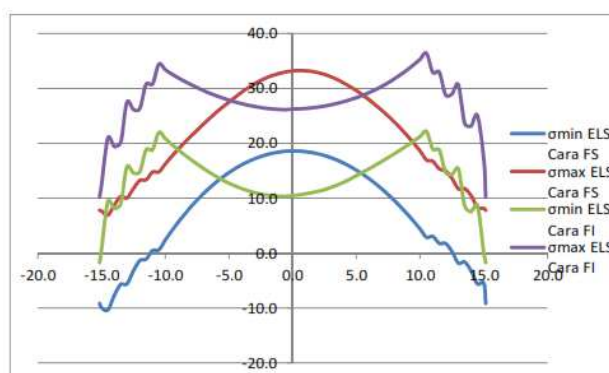


Diagramme des contraintes enveloppe 3000 du modèle ST1

V.3.2.4. Enveloppe ELS caractéristiques

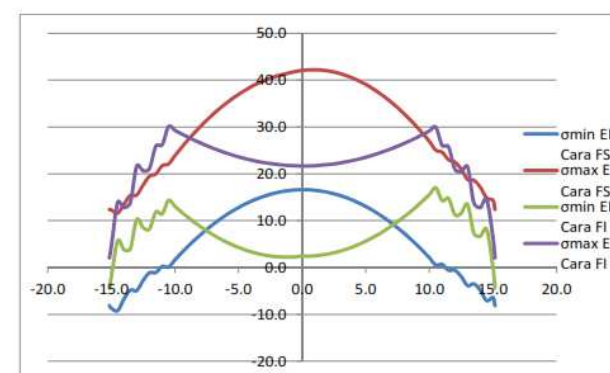


Diagramme des contraintes enveloppe 3000 du modèle ST1 isostatique

Contraintes normales dans les poutres ITE (modèle "hyperstatique") :

	Traction maximale en fibre >	Contrainte maximale en fibre <	Contrainte mini en fibre < (enrobage)
Mise en précontrainte	-2.5 MPa > -6 MPa : OK	35.5 MPa < 60 MPa : OK	0 MPa > -6 MPa : OK
ELS quasi-permanent	-	32.6 MPa < 72 MPa : OK	0.5 MPa > 0 MPa : OK
ELS caractéristiques	-	36.4 MPa < 96 MPa : OK	-1.7 MPa > -5.93 MPa : OK

Les contraintes normales sont largement vérifiées même en schéma isostatique.

Les études d'exécution

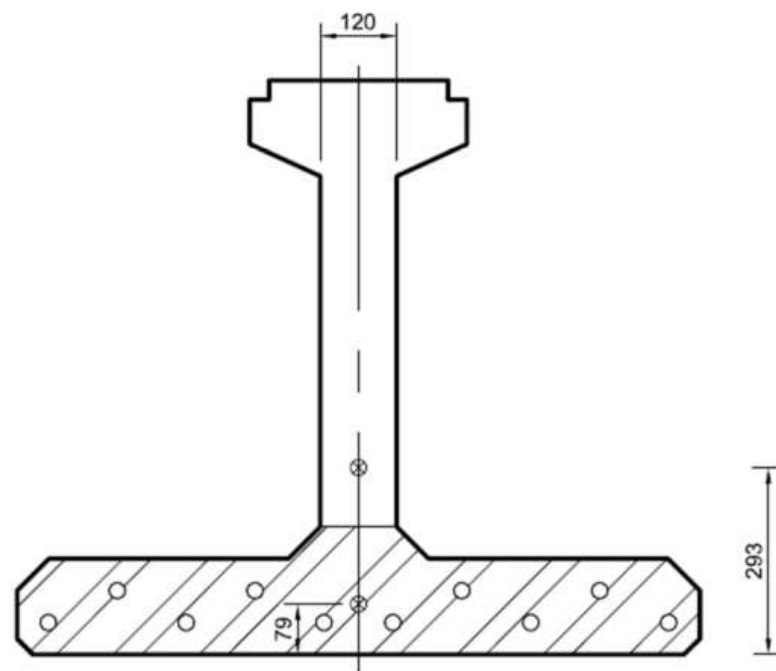
Justification du tablier – Contraintes tangentés :

Contrainte maximale de cisaillement (ELU) dans l'âme aux abouts :
6.7 MPa (tranchant) + 1.25 MPa (diffusion de la précontrainte) = 7.95 MPa

Résistance au cisaillement des
fibres seules : 7,15 MPa

Résistance au cisaillement de
tranchant du béton : 2 MPa

Les fibres seules (hors contribution du
béton) reprennent quasiment le
cisaillement sollicitant.



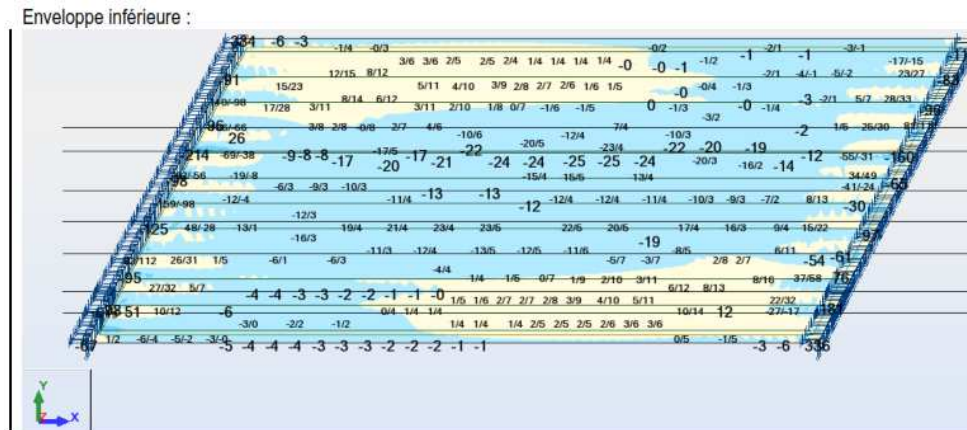
L'emploi d'armatures de reprise de cisaillement n'a pas été nécessaire.

Les études d'exécution

Justification du tablier – Calcul du hourdis (épaisseur 22 cm) :

- Flexion transversale : Modèle aux éléments finis compte-tenu de la valeur du biais (70 grades)

Ferrailage → HA16 e=125
en nappes < et >.



- Flexion longitudinale :

Reprise des efforts de traction avec les 2 nappes de ferrailage.

Pour réduire le ferrailage, le bureau d'études a fait une justification particulière à la fatigue afin de limiter les contraintes à 400 MPa en ELS caractéristique (au lieu de 300 MPa sans justification à la fatigue).

Ferrailage → HA20 e=100 en nappes < et > en zone de traction maxi (abouts)
→ HA16 e=100 en nappes < et > en zone courante

La densité de ferrailage (hourdis+encastremements+longrines) est > à 300 kg/m³

Les études d'exécution

Justification du tablier :

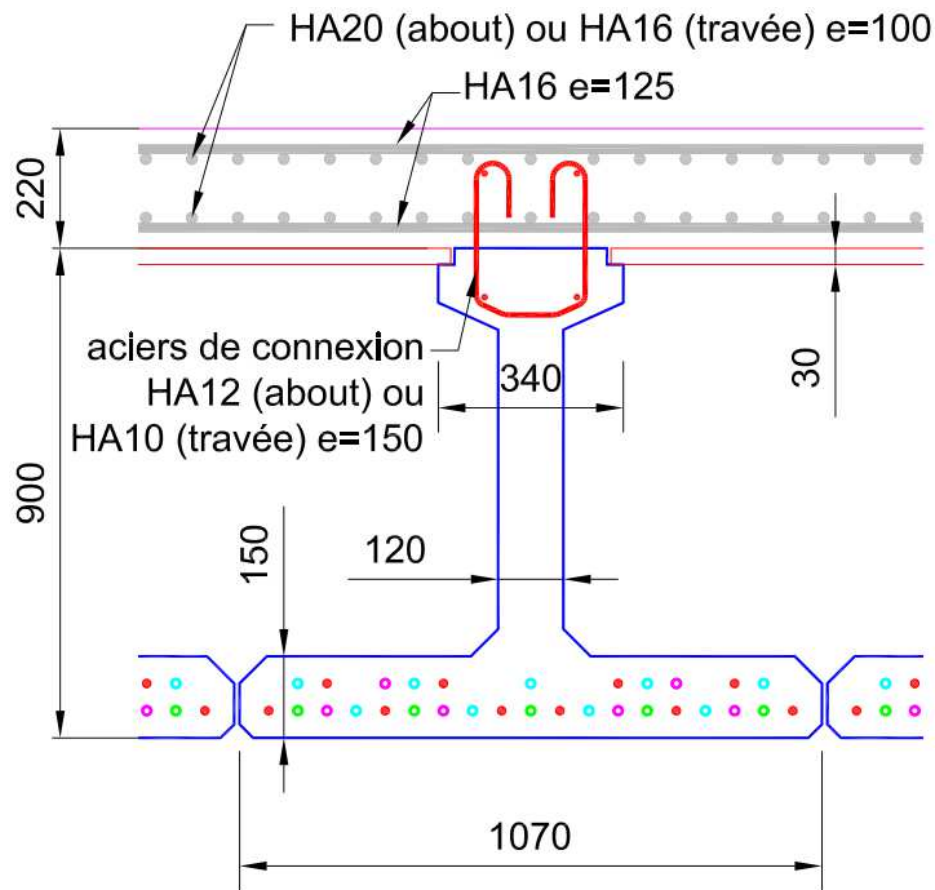
- Longueur finale des poutres : 30,60 m (23,2 t)

- Largeur droite : 13 m

- 30 torons T15S 1860 MPa
TBR par poutre

Etagement de la précontrainte :
4 abscisses d'activation
(about, 1.5m, 3m et 4m de l'about)

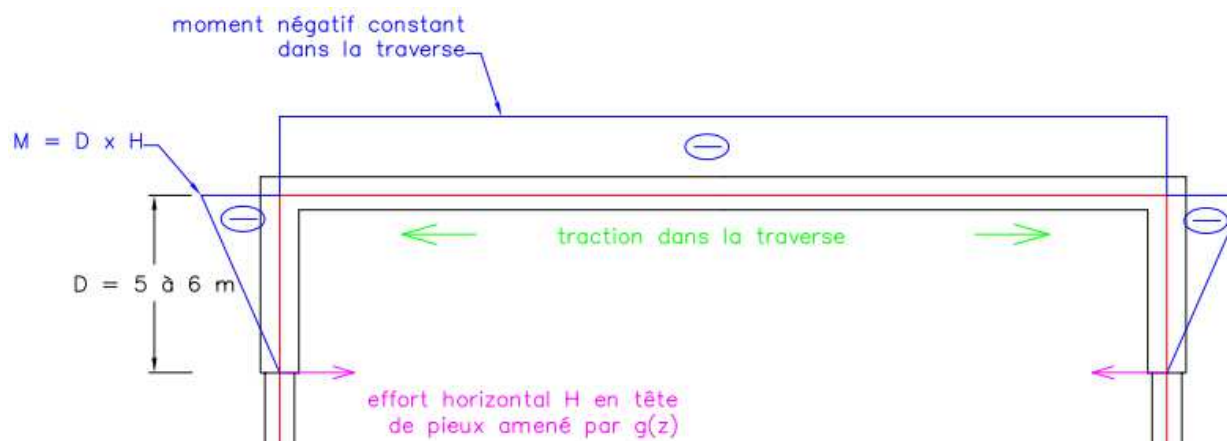
- Hourdis en C35/45 connecté
avec aciers en « U » et filants



Les études d'exécution

Justification des fondations :

- Un double-tubage des pieux (sur 3 à 4m) avec vide annulaire de 10cm a été réalisé afin de s'affranchir de l'action du fluage horizontal $g(z)$ des premières couches compressibles qui aurait augmenté la traction dans la traverse.



- Suite à la réduction de hauteur d'encastrement, on est passé à 4 pieux $\text{Ø}1000$ de longueur 15 m (ferraillage maxi : 24 HA32 = 2,45 % de la section).
- La souplesse des pieux diminue l'effet d'encastrement en tête des péroits.

Les études d'exécution

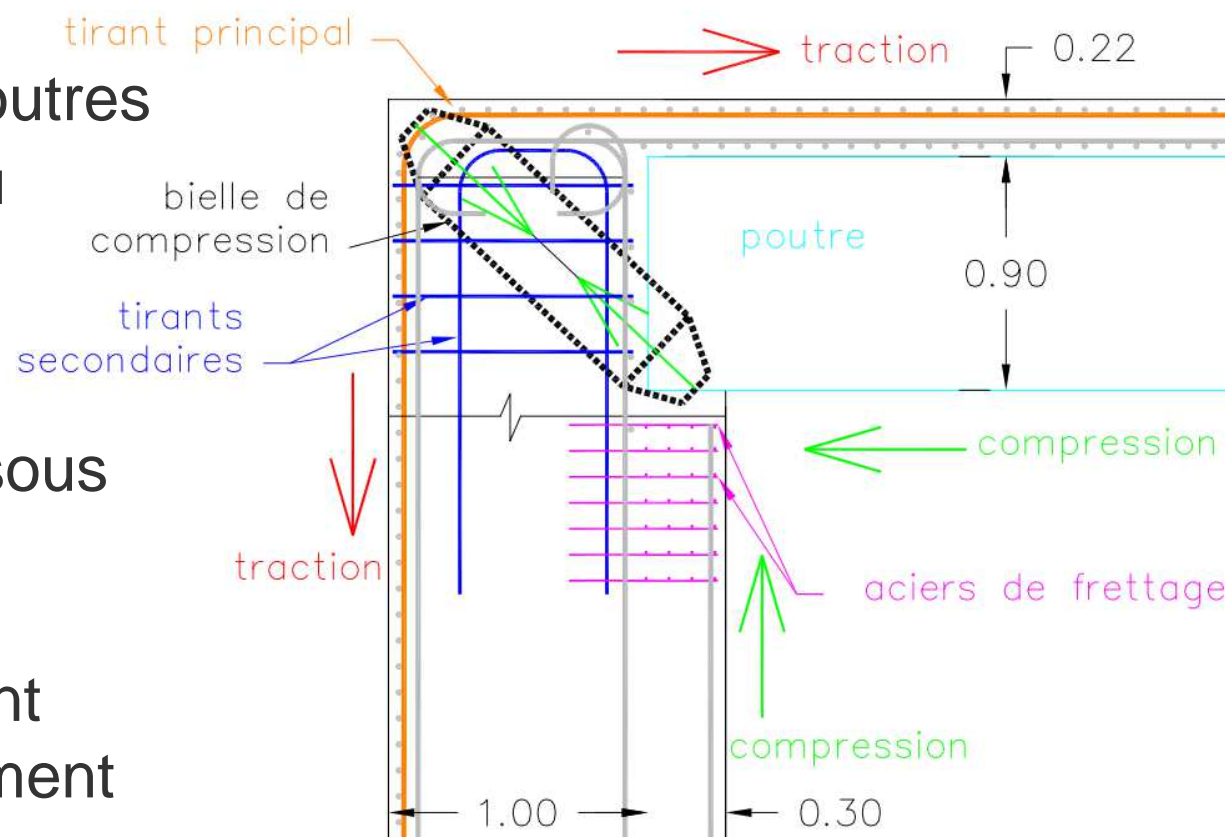
Justification de l'encastrement : Modèle Bielles/tirants :

→ Allongement des poutres

(Repos de 30 cm au lieu de 15 cm)

→ Aciers de frettage sous la poutre

→ Ferrailage important du nœud d'encastrement



Bilan sur la solution BFUP

Avantages du pont intégral à poutres BFUP :

- Elancement important du tablier → possibilité d'abaisser le PL et de réduire les hauteurs de remblai
- Mise en oeuvre rapide et sécurisée du tablier (talons de poutres jointifs)
- Durabilité du matériau BFUP → coûts d'entretien réduits
- Optimisation des fondations : pieux Ø 1000 contre Ø1200 en base
- Pont intégral → Gains sur les coûts de maintenance des appareils d'appui et des joints de chaussée.

Point sensible : encastrement piédroit / hourdis

La préfabrication des poutres

Réception des matériaux – préparation du banc de fabrication :

La fabrication des poutres est sous traitée à l'usine MATIERE de Brive.



28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt

 Cerema

La préfabrication des poutres

Fabrication du BFUP – essais préalables :



28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt

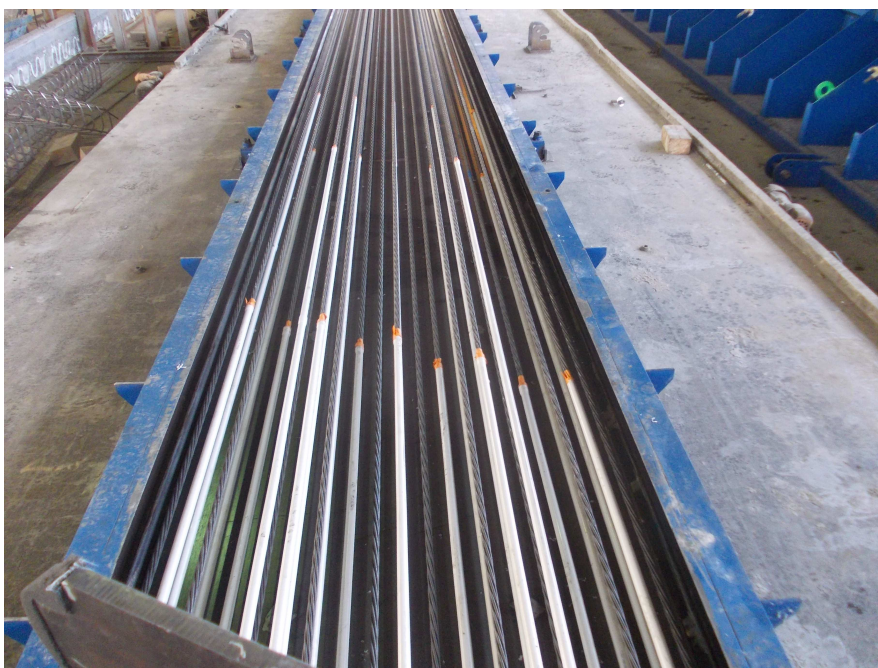
 Cerema

La préfabrication des poutres

Phases de bétonnage :

Afin d'obtenir un parfait remplissage du coffrage, et compte-tenu de la forme du talon conjuguée à la présence des 30 torons avec leurs gaines partielles pour certains, le bétonnage s'effectue en deux phases.

première phase: bétonnage du talon inférieur.



La préfabrication des poutres

Phases de bétonnage :

première phase: bétonnage du talon inférieur.



28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt

 Cerema

25

La préfabrication des poutres

Phases de bétonnage :

Une fois le talon rempli, on procède à la mise en place de la partie supérieure du coffrage.

deuxième phase: bétonnage de l'âme et du talon supérieur dans lequel on a placé les armatures de connexion en attente.



La préfabrication des poutres

Phases de bétonnage :

deuxième phase: bétonnage de l'âme et du talon supérieur.



28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt

 Cerema

27

La préfabrication des poutres

Décoffrage, détension des câbles, levage et stockage :

Le cycle de préfabrication était de 48 heures, dont environ 20 heures de durée de prise imposée par le critère de résistance ($R_{c,mini} = 100\text{MPa}$) pour la mise en précontrainte, qui engendrait: $\sigma_{inf,max} = 36\text{ MPa}$ et $\sigma_{sup, min} = -2,5\text{ MPa}$.



La réalisation des pieux



28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt

 Cerema

La construction des piédroits



28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt

La mise en place des poutres



Les poutres sont disposées
en escalier :



28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt

La pose des coffrages perdus



28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt

 Cerema

Le ferrailage du tablier

Vue générale :



Détail de l'encastrement

Le bétonnage du hourdis



28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt

 Cerema

L'ouvrage terminé



28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt



Cerema

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

Merci de votre attention

Laurent LOUTTE

laurent.loutte@cerema.fr

28 et 29 juin 2017

Reconstruction du pont sur
l'Orne à Boncourt