

15 mai 2012

Le pont de Saint-Nazaire : la réparation des travées d'accès



La délégation AFGC Grand Ouest a organisé une visite du chantier consacrée au renforcement du pont de Saint-Nazaire.

Rappel du programme

- 9h00 : Accueil des participants
- 9h30 : Introduction et présentation de la journée
Christian Tessier, Gérard Grillaud
AFGC Grand Ouest
- 10h00 : Présentation générale de l'ouvrage
Les dégradations, les investigations, et les réparations initiales
Philippe Griaud, Conseil Général 44
- 11h00 : Le projet, le renforcement de la demande initiale à la finalisation
Philippe Griaud, Conseil Général 44
F. Lanquette, Setec
- 12h00 : Présentation des études d'exécution et des études méthodes
S. Braquehais, Bouygues
- 13h00 : Déjeuner
- 14h30 : Visite pour les groupes 1 et 2
Projection en salle pour groupes 3 et 4 :
Le déroulement des travaux
Bouygues
Les contrôles
H. Davias CETE Ouest – LR d'Angers
L'instrumentation future
Setec

Les apports du viaduc de St Nazaire dans l'approche aérodynamique des ouvrages
Gérard Grillaud, CSTB

15h45 : Visite pour les groupes 3 et 4

Projection en salle pour groupes 1 et 2

17h00 : Fin de la journée

Bref historique



Mis en service en 1975, le pont de Saint Nazaire Saint Brévin sur l'estuaire de la Loire était à l'époque le plus long pont réalisé en France; il a en outre détenu pendant 8 ans le record mondial de portée pour un pont haubané.

D'une longueur de 3356 m, il est constitué de deux viaducs d'accès en béton précontraint (VIPP à 4

poutres de 2,8m de hauteur) de 1115 m au Nord et de 1521 m au Sud, et d'un ouvrage principal métallique haubané, de 720 mètres de longueur, avec une travée centrale de 404 m.

A l'origine à péage, l'ouvrage est géré et entretenu par le Conseil Général de Loire Atlantique depuis 1995. En 1998, un programme d'inspection des viaducs d'accès a été engagé et des dégradations liées à la corrosion des armatures ont été mises en évidence.

Depuis lors, le pont de Saint-Nazaire Saint-Brévin a fait l'objet de plusieurs campagnes de réparations afin de stopper le processus de dégradation par corrosion.

Pour les travées sud de l'ouvrage, suite aux études conduites par SETEC TPI, c'est une solution de renfort des poutres par précontrainte additionnelle via un renfort des talons qui a été adopté, ainsi qu'un renfort des poutres à l'effort tranchant par matériau composite.

Les méthodes de réalisation des travaux, réalisés par BOUYGUES TP, ont fait l'objet de réflexions particulièrement complexes, étant données la configuration du site et l'exigence de maintien de l'exploitation de l'ouvrage : deux pontons flottants

Les manifestations régionales

sont hissés sous l'ouvrage pour permettre la réalisation des travaux sans gêner les automobilistes.

Synthèse des présentations

Présentation générale de l'ouvrage

Les dégradations, les investigations, et les réparations initiales

Philippe Griaud, Condeil Général 44

Enjeux économiques et fonctionnels :

- Un itinéraire d'intérêt interrégional,
- Seul pont avant Nantes,
- Présence des ports de Nantes - Saint Nazaire,
- Exposé aux risques de fermetures (météo) -> règles de gestion

Enjeux techniques :

- L'ouvrage est dans un site agressif, (site maritime, tempêtes....)
- Son âge, 37 ans, et certaines pathologies justifient un entretien significatif



Caractéristiques

Viaduc béton nord: 1115 m,
Viaduc béton sud: 1521 m
Ouvrage métallique haubané: 720m
Longueur totale de 3356 m (l'ouvrage reste le plus long pont de France)
Une chaussée de 12 m (3 voies en gestion alternée suivant trafic)
Deux passages de service de 0,75 m



Présentation du pont de Saint-Nazaire :

- Un ouvrage métallique haubané de 720 m de long,
- Un caisson de 15 m de large et 3,50 m de haut, supporté par 72 haubans, entretoisé tous les 4 mètres.
- L'épaisseur des tôles entre 12 et 16 mm, raidies par des augets.
- Le platelage est également appelé « dalle orthotrope ».

Construction de l'ouvrage

Ouvrage métallique : Travée de rive en hissage, pylône couché et hissage des tronçons

Viaducs d'accès :

52 travées de 50,70 m: 22 au Nord, 30 au Sud

Mise en place par une poutre de lancement

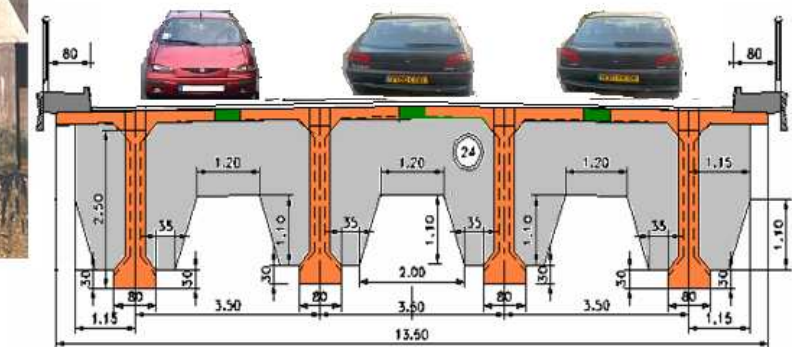
Chaque travée comporte 4 poutres de 2,80 m de haut et un hourdis

Les travées sont par groupes de 4, séparés par des joints de chaussée.





COUPE SUR POUTRES et HOURDIS DES VIADUCS BETON



Les piles

Les piles courantes sont constituées de deux fûts en forme de H reposant sur une semelle fondée sur quatre pieux (diamètre 1.50 m à 1.80 m.)

Hauteur variable de 3,60m à 56,30m



Les semelles des piles ont été construites à l'intérieur d'un batardeau en palplanches métalliques (aujourd'hui enlevées), après réalisation d'un massif de béton immergé.

Les piles principales sont creuses et formées de quatre cellules verticales.

Ces piles supportent, le tablier métallique, et les pylônes de haubanage.

Elles sont fondées sur 18 pieux de diamètre 1.80m et d'une longueur d'environ 50m.

Ces piles sont implantées de part et d'autre du chenal dont la profondeur atteint localement 15 m.

Des masques d'encrochements fortement talutés assurent une protection sommaire vis à vis des chocs de bateaux.



72 haubans en câbles toronnés dits « clos »
Ils comportent trois ou quatre couches extérieures de fils "Z" dont les deux dernières sont galvanisées, et un noyau de couches internes de fils ronds et clairs.

Le remplissage entre fils est assuré par un produit gras, ou par du polyéthylène amorphe.

Les diamètres sont variables de 72 mm à 105 mm.



Les haubans sont fixés :

- Aux pylônes par des attaches mécano-soudées solidaires d'un culot et articulées sur le pylône.
- Au tablier par un dispositif de tension associant une oreille solidaire du tablier, une chape de fixation articulée en pied, filetée en tête, une douille de réglage et un culot fileté.

Le réglage de la tension du hauban est assuré par le vissage de la douille, (filetages internes à pas inversés).

Principaux travaux réalisés précédemment ou en cours

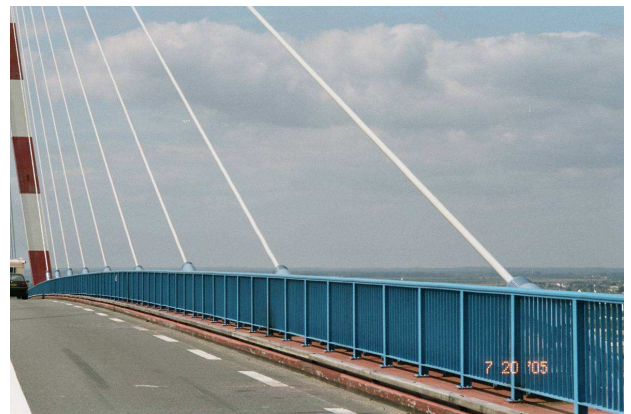
Indépendamment du renforcement structurel, le pont fait l'objet d'un programme d'entretien et de réparation conséquent, notamment :

Les manifestations régionales

Restauration du haubanage (réalisé 2004-2005)



Avant



Après

Travaux sur fondations

Enrochements, (dernière campagne 2011)
Démolition de bétons immergés (pm)



Les réparations des piles (en cours et à venir)

Désordres constatés :

- Fissures verticales notamment dans les angles
- Éclats de béton

- Coulures d'oxydes
- Vieillessement des peintures de protection



- Teneurs en chlorures acceptables pour les piles terrestres nord -> Travaux classiques
- Dépassement des seuils pour les piles maritimes sud -> recours à d'autres méthodes (à valider techniquement) comme la protection cathodique

Les manifestations régionales



- Défauts d'enrobage et de maintien des aciers



Accès sur pile terrestre

Les manifestations régionales

Les réparations des tabliers béton VIPP:

- Justifications et consistance des travaux :
Exemples de désordres initiaux (2000) sur les bétons : éclats, bétons sonnante creux, défauts d'enrobage, corrosion des aciers



Accès par voie maritime



Travaux de réparations:

La première campagne de travaux, au mois d'avril 2003, a été l'occasion de mettre en évidence des ruptures de fils de précontrainte sous corrosion fissurante. -> Cet élément nouveau dans le diagnostic a conduit à mettre en place un Comité Technique de suivi.

Après septembre 2003, les travaux ont été l'occasion de mettre en évidence des désordres en talons de poutres mais aussi dans les âmes (de faible épaisseur), parfois sur la précontrainte, avec ou sans fils cassés, avec corrosion classique des passifs, et parfois corrosion fissurante sous tension probable des fils KA, avec présence de chlorures.

→ Etudes d'un renforcement lancées dès 2006



Réparations par béton projeté



Pile réparée et protégée par un revêtement LHM

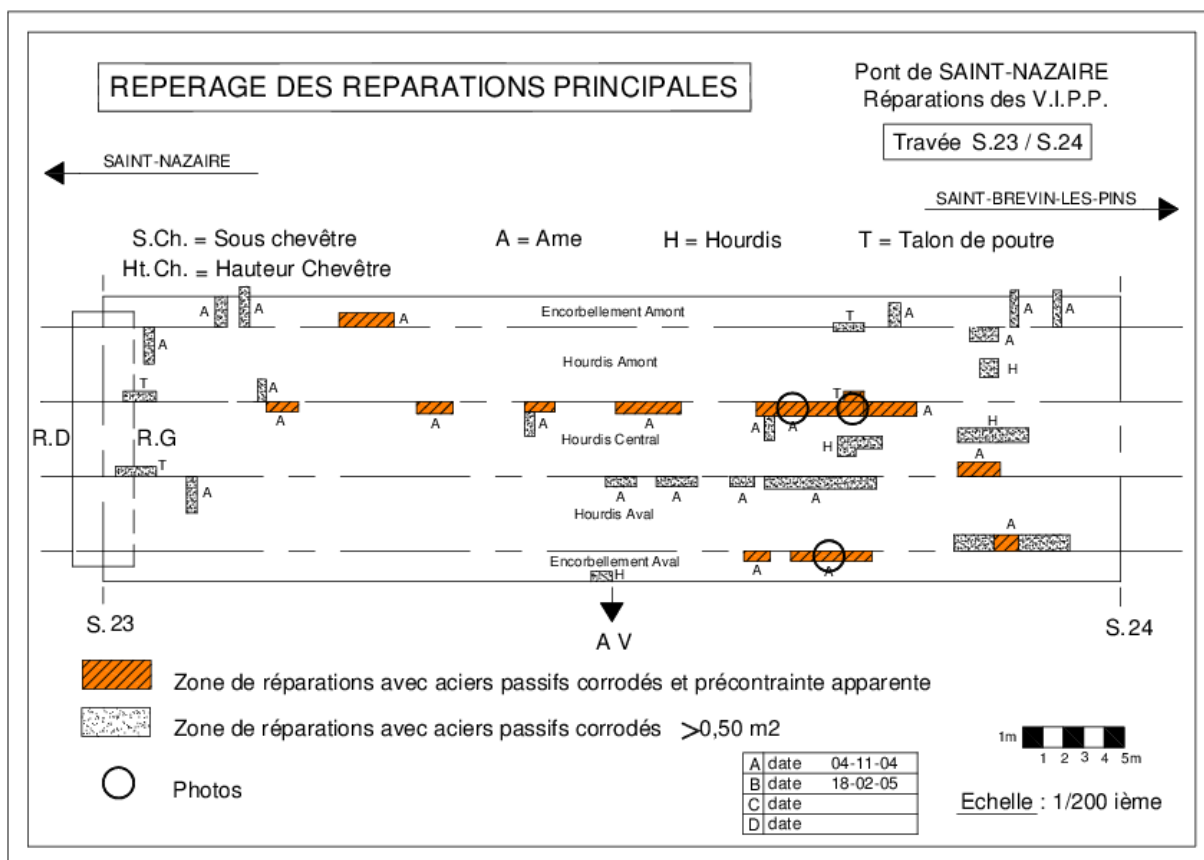
Quelques constats



Justifications et consistance des travaux:

Exemples de désordres majeurs sur les bétons:
attaques de corrosion sur la précontrainte et fils cassés

Poutre (la plus dégradée) après décapage en talon, et avant réparation



Éléments nouveaux (juillet 2008):

Ruptures de fils groupées sous l'ancrage d'un câble relevé en extrados, en partie haute de l'âme (photo câble N°9 de la poutre centrale - travée S17 S18).
Type de défaut nouveau et non pris en compte dans la modélisation des pertes de précontrainte,



Réparation par mortiers projetés mais pas de « réparation » de la précontrainte



Les manifestations régionales

Avancement :

Avril 2003, jusqu'à fin 2009 : 20 travées au sud (deux marchés)

Reprise en octobre 2010 pour les 10 travées sud restant et les travées nord.

Les actions d'accompagnement:

- Novembre 2003 → mise en place d'un Comité technique d'experts
- Décembre 2003 → interdiction aux poids lourds > 40 tonnes
- Janvier 2004 – déc 2004 puis avril 2005 → Essais en charge (l'ouvrage a un fonctionnement satisfaisant au regard de la sécurité)
- Mai 2004 → premières réflexions, nécessité des études de renforcement
- Avril 2006 - Octobre 2008 → études de « faisabilité d'un renforcement » et mise au point de la solution de renforcement suite au nouveau constat de désordres
- Diverses Investigations et inspections en parallèle
 - sur la présence de chlorures, sur l'avancement de la corrosion en présence d'un procédé de précontrainte défaillant,
 - sur le viaduc nord.

Travée	Poutre	Partie	Localisation	Probabilité de corrosion (%)		Vitesse de corrosion			Enrobage (mm)		Profondeur d'investigation (mm)	Teneurs en chlorures (%)	pH	Cl ⁻ / OH ⁻
						Courant (µA/cm²)	Vitesse (mm/an)	Potentiel (mV)	mesuré sur carotte	moyen				
S24-S25	Centrale Aval	Ame Amont	Mi-travée	55	45	0,04	0,001	-225	20	> 45	20-25	0,073	12	7,3
		Talon	Proche S24	66	34				-	> 60	-	-	-	-
		Talon	Mi-travée	99					25	> 29	25-30	0,020	12,3	1,0
		Talon	Proche S25	25	73	0,22	0,0022	-329	40	> 39	35-40	0,238	11,9	30,0
									35	> 39	35-40	0,128	11,9	16,1
		Ame Aval	Mi-travée	99		0,06	0,001	3	65	> 51	30-35	0,003	12,4	0,1
	Aval	Ame Amont	Mi-travée	100					33	> 47	65-70	0,003	12,5	0,1
		Talon	Proche S24	92	7 1	0,23	0,0023	-139	45	> 30	33-38	< 0,001	12,1	< 0,1
		Talon	Mi-travée	99		0,50	0,005	-110	-	> 27	20-25	0,018	12	1,8
											45-50	0,009	12,1	0,8
		Talon	Proche S25	65	33 2	0,23	0,0023	-203	34	> 41	31-36	0,200	12	20,0
						0,30	0,003	-261	55		20-25	0,367	12,1	29,1
											55-60	0,150	12,5	4,7
		Ame Aval	Mi-travée	99		0,18	0,0018	-66	45	> 50	20-25	0,011	11,9	1,4
											45-50	0,001	12	0,1

Au regard de la corrosion:

Seuil critique de chlorures libres en poids par rapport au ciment : 0,5 %

Seuil critique de dépassement, prenant en compte à la fois la teneur en Cl⁻ et le pH, - rapport Cl⁻/OH⁻ de 0,6 (en % massique par rapport au béton).

Les manifestations régionales



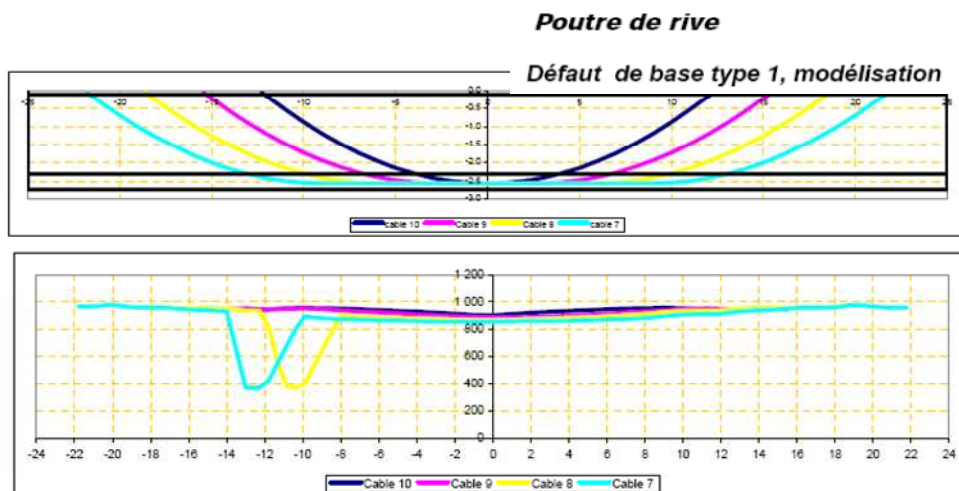
Observations sur fils rompus du câble N°9:

- coulis intact, sec, avec traces d'oxydation,
- oxydation présente sur tous les fils (petites piqures et parfois de cratères),
- tous les faciès de rupture des fils prélevés sont de type semi-fragile,
- les fissures sont amorcées, soit sur des défauts bien visibles (piques ou cratères), soit sur une surface qui apparaît exempte de défaut,
- corrosion sous contrainte induite par hydrogène
- phénomène en phase évolutive,
- Par rapport aux travées basses où le rôle des chlorures est relativement affirmé (feuillard dissous, fils corrodés et en cours de dissolution), on retrouve le même mécanisme de dégradation en travées intermédiaires (pénétration des chlorures plus rapide et en concentration plus élevée suivant l'altitude de la travée).

Renforcement des Viaducs

Le projet de renforcement:

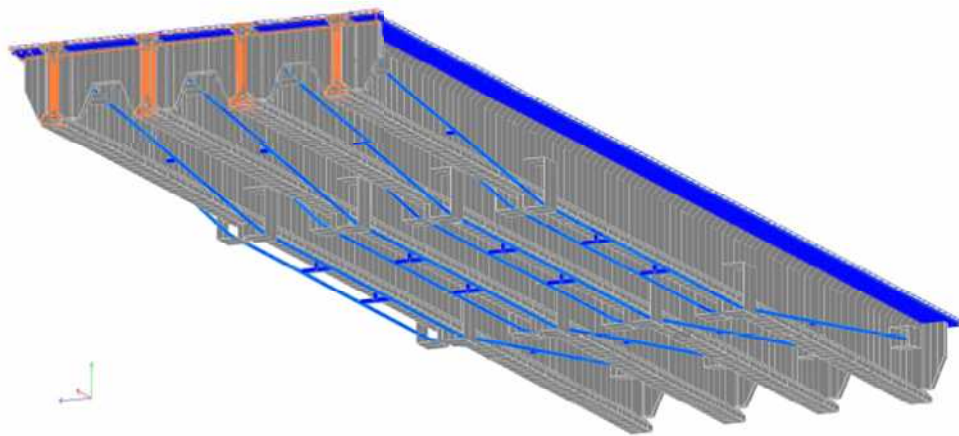
a) Justifications des travaux



Le diagramme ci-dessus montre les variations de tension envisagées pour les câbles de la deuxième famille.

Une perte de précontrainte pouvant atteindre localement 10 à 20% justifiant le renforcement des poutres

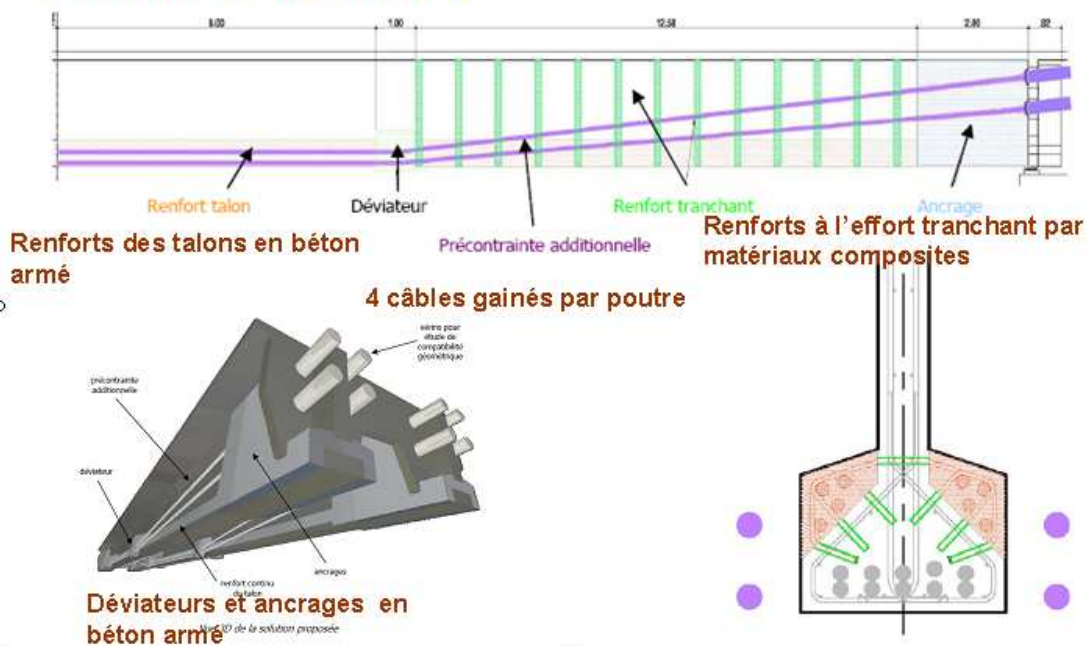
b) Consistance des travaux



Un renforcement par ajout d'une précontrainte extérieure au béton dite « précontrainte externe »

Le projet de renforcement : SETEC TPI

Consistance des travaux



Montant des travaux : environ 20,840 M€ TTC

Programmation : 3 ans, à partir du 5 juillet 2010

Intervenants :

- Entreprise Bouygues TPRF
- Maîtrise d'œuvre: SETEC TPI
- Laboratoire de contrôles: LRPC Angers RST

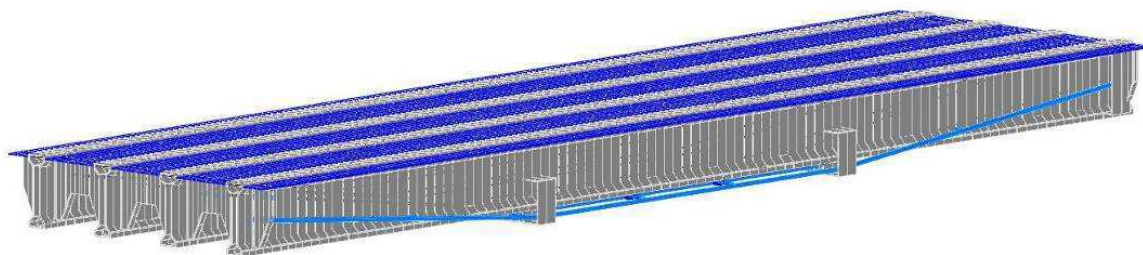
Le projet de renforcement de la demande initiale à la finalisation

F. Lanquette, Setec

Etude de faisabilité

Insuffisances réglementaires de la poutre saine
Défauts de précontrainte ponctuels quantifiés et localisés à partir des défauts constatés majorés (max 30% de ruptures)

Solution de référence : précontrainte extradossée composée de 2 câbles 8T15S dans une gaine métallique (parachute en cas de rupture)



Flexion ELS : Vérification en Classe I avec 30% de pertes

Flexion ELU : Vérification en « ELU fondamental » avec charges fréquentes et 70% de pertes

Vérification en ELU accidentel avec charges fréquentes et 100% de pertes

Cisaillement ELS : Vérification du béton OK

Cisaillement ELU : Manque d'armatures d'effort tranchant dans les 10 m près des appuis

Optimisations envisagées :

- Tracé des câbles près des appuis
- Ajout de déviateurs intermédiaires pour limiter la surtension dans la précontrainte existante à la rupture

ENTRE FAISABILITE ET AVP

- Découverte d'une rupture de câble au niveau d'un corps d'ancrage
- Demande pour les études AVP d'envisager des ruptures de câble en tout point de la poutre
 - ➔ Abandon des « défauts constatés majoré » au profit de ruptures tous les 5 m

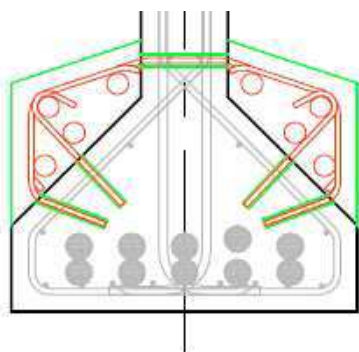
AVP

Objectif n°1 :

Détermination de la précontrainte additionnelle maximale en flexion ELS

Solution isostatique avec précontrainte additionnelle extérieure :

- dans gaines métalliques
- dans gaines souples avec renfort de talon



Variables :

Nb de câbles de précontrainte additionnelle

Nb d'armatures de gros diamètre en renfort dans le talon / section des tubes métallique

- Pourcentage de perte admissible

Dimensionnement :

- Compression fibre inférieure à la mise en tension et sous ELS QP dans la poutre saine
- Traction en fibre inférieure sous ELS rare avec rupture

Modèle PYTHAGORE

- Cas différenciés de ruptures de câbles
- Réancrage de la précontrainte
- Phasage précis et effets différés
- Etude d'une poutre centrale
- Précontrainte existante: pertes P2

Etude ELS de la solution Tubes

Description:

- 2*2 câbles additionnels 8 T15S - précontrainte non adhérente.
- Tubes acier d'une section de 50 cm² (Faisabilité: 28 cm²)
- 2 déviateurs à 8.50m du centre de la poutre
- 3 massifs d'ancrage situés au centre et à 15 m du centre

Résultats:

Contrainte maximum en talon à la mise en tension: 14.5MPa<17.5MPa

Etude ELS de la solution HA

Description:

- 2*2 câbles additionnels 8 T15S - précontrainte non adhérente.
- Deux poutres en béton armé de part et d'autre du talon armées par 2*4 HA40 en Fe E500 dans la partie à âme constante, et 2*2 HA40 ailleurs.
- 2 déviateurs à 8.50m du centre de la poutre

Résultats:

Contrainte maximum en talon à la mise en tension: 14.0MPa<17.5MPa

Objectif n°2 :

Vérification de la sécurité maximale en flexion ELU

- Prise en compte comportement fissuré

- Comparaison avantages/inconvénients en termes de déformation et de fissuration entre la solution gaines métalliques et le renfort du talon
- Aux ELU accidentels, recherche pour 100% de rupture de précontrainte des charges maximales admissibles

Etude ELU fondamentaux de la solution Tubes

Cas le plus préjudiciable: 70% de rupture pour $x_{rupt} = -5m$

Allongement en fibre inférieure: 25‰

Câbles non rompus travaillant à f_{prg}

Contrainte dans le tube: de +92 MPa à -217 MPa

Etude ELU fondamentaux de la solution HA

Cas le plus préjudiciable: 70% de rupture pour $x_{rupt} = -10m$

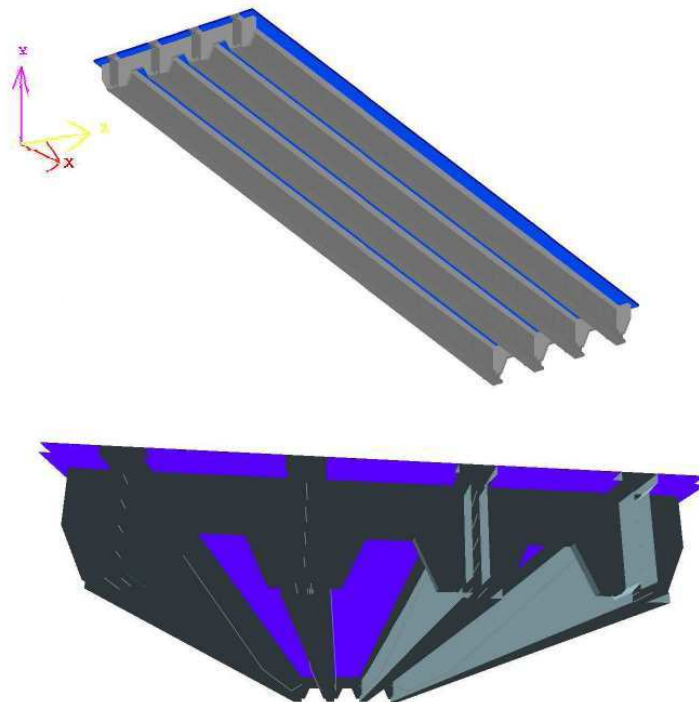
Allongement en fibre inférieure: 6‰

Câbles non rompus travaillant à $0.7f_{prg}$

Contrainte dans le tube: de +33 MPa à -340 MPa

PROJET

Modèle



Objectif n°3 :

Amélioration du comportement sous effort tranchant

- Problématique identique pour les deux solutions
- Pas de problème à l'ELS
- Déficit d'armatures d'effort tranchant à l'ELU pour des ruptures >
- 30%
- Ajout d'armatures verticales ou inclinées pour combler un manque de résistance au cisaillement de 0.9 MPa

Problématique identique pour les deux solutions

- Pas de problème à l'ELS
- Déficit d'armatures d'effort tranchant à l'ELU pour des ruptures > 30%
- Ajout de bandes de matériau composite combler un manque de résistance au cisaillement de 0.9 MPa

Etudes de détails

- Vérification du hourdis – flexion transversale
- Scellement du renfort de talon
- Fissuration du renfort
- Clouage des massifs d'ancrage et des déviateurs
- Diffusion de la précontrainte aux abouts
- Renfort de la bielle d'about

- Etude du phasage de renforcement:

1. Réalisation des massifs d'ancrage et déviateurs

2. Mise en précontrainte à 20% pour limiter la décompression du talon à 1.5 MPa sous poids propre des massifs + charges de chantier
3. Réalisation du renfort de talon
4. Mise en tension à 100% - écart de précontrainte additionnelle entre 2 poutres adjacentes < 20%

Ancrage du renfort

Sur quelle longueur ancrer le renfort pour limiter la surtension dans les câbles existants?

En pratique: ancrage du renfort sur 1.50 m de part et d'autre de la rupture

DCE ACT

DCE - Teneur du renforcement structurel

- Précontrainte additionnelle
- Massifs d'ancrage et déviateur
- Renfort de talon
- Renfort par matériaux composites
- Instrumentation
- Revêtement de protection

Précontrainte additionnelle : 250 t

Massifs d'ancrage : 320 m3 C40/50

Massifs déviateur : 1740 m3 C40/50

Renfort de talon : 710 m3 C40/50

440 t armatures HA

140 000 percements

Renfort par matériaux composites :

3300 m² (calcul MOE – cas TFC)

Instrumentation

Revêtement de protection :

60 000 m² revêtement

21 000 m² inhibiteur de corrosion

Contraintes à prendre en compte

- Travaux sous circulation,
- Le site en estuaire (marées, bathymétrie,...).
- Travaux répétitifs, quantités importantes,
- Des conditions météorologiques spécifiques : Vent, pluies, humidité,...
- La hauteur du pont (50 m au dessus du plan d'eau au droit de l'ouvrage principal haubané).
- Site sensible (Loire et abords).
- Délai de 3 ans.

ACT

Analyse des offres

Trois offres:

- Groupement QUILLE/DV Construction/VSL France
- Groupement Freyssinet – GTM
- Eiffage TP
 - ➔ Propositions de méthodes variées et intéressantes
 - ➔ Variantes techniques très cadrées - pas de grosses surprises

EIFFAGE

Remblai provisoire sur 2 travées + estacade sur 12 travées + poutre de lancement

QUILLE BOUYGUES VSL

Remblai provisoire sur 2 travées + 4 demies plateformes flottantes approvisionnées depuis le port + 2 plateformes peinture

Les manifestations régionales

FREYSSINET GTM

Remblai sur 1ère travée + estacade et quai sur pilotis sur la travée suivante + 2 plateformes flottantes

- ➔ Groupement retenu : Groupement retenu: QUILLE/DV Construction/VSL France

Présentation des études d'exécution

E. Colibert, Bouygues

Les études d'exécution

Etudes réalisées par la Direction Technique Bouygues TP Régions France

Modélisation générale de l'ouvrage réalisée à l'aide du programme de calcul PONT développé par Bouygues TP avec l'appui :

- de la Direction Technique Bouygues TP
- du Pôle Informatique Technique Bouygues TP

L'ouvrage existant

30 travées de 50,70 m de longueur : constituées de 4 poutres en béton précontraint, chaque poutre précontrainte par 10 câbles de type KA

Les piles courantes :

- sont constituées de deux fûts en forme de H faiblement armés
- reposent sur une semelle de 13 m x 7 m x 2 m
- possèdent 4 pieux de diamètre 1,50 m à 1,80 m
- sont couronnées d'un chevêtre de 12 m x 3 m x 1,5 m

Le renforcement

- Précontrainte additionnelle :
 - 4 câbles 8T15s par poutre
 - Ancrés au niveau des entretoises d'about renforcées par des bossages d'ancrage
 - Déviés à 8,50 m de l'axe de la poutre par des bossages déviateurs
- Renforcement du talon de poutre en béton armé de 4HA40
- Renforcement de la bielle d'about

Principales hypothèses de calcul

- Documents de référence :
 - Fascicule 61 titre II « Conception, calcul et épreuve des ouvrages d'art »
 - BAEL 91 révisé 99
 - BPEL 91 révisé 99
 - Fascicule 62 titre V du CCTG « Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil »
 - Recommandations provisoires de l'AFGC « Réparation et renforcement des structures

- Matériaux :
 - o Béton des poutres : f_{c28} : 35 MPa
 - o Béton de renfort : f_{c28} : 40 MPa
 - o Aciers existants des poutres : f_e = 400 MPa
 - o Aciers de renfort : f_e = 500 MPa
 - o Enrobages réduits à 4 cm (utilisation d'un revêtement de protection sur l'ensemble de parements considérés)

Précontrainte

Câbles existants:

Câbles additionnels : 8T15s

- f_{prg} : 1860 MPa
- $S = 1200 \text{ mm}^2$
- tension maximale sous ancrage 0.75 f_{prg} soit 1395 MPa (cf. NF P 95-104)
- relaxation (TBR) : 2.5% et $\mu = 0.43$
- coefficient de frottement suivant annexe 3 du BPEL 99 (câbles extérieurs) : $f = 0.12$ et $\Phi = 0$ (torons clairs dans tube PEHD) ou $f = 0.05$ et $\Phi = 0.001$ (torons gainés protégés)

Hypothèses géotechniques

- Fortes épaisseurs de sable de Loire
- Substratum rocheux gneissique
- Importants dépôts de vase en surface et en profondeur
- Dépôts d'argile et de limons en profondeur

Cas de charges

- Poids propre :
 - o Pris en compte avec une fourchette de +/-3%
 - o Béton de renfort de talon pris égal à 2,9 t/m³
- Superstructures :
 - o Prises en compte d'après les plans de construction de l'ouvrage
 - o Epaisseurs d'enrobé estimées sur la base des auscultations Radar
- Actions dues à la précontrainte existante:
 - o Valeurs de pertes retenues : P2
 - o Ruptures de câbles modélisées :
 - Avec un réancrage progressif sur l_{sn}
 - Aux abscisses $x = 0 \text{ m}$, $x = -10 \text{ m}$, $x = -15 \text{ m}$ et $x = -20 \text{ m}$
 - Conduisant à une section résiduelle de précontrainte de 100%, 70% ou 30%
- Actions dues à la précontrainte additionnelle :
 - o Mise en tension à 20% avant bétonnage des renforts de talon
 - o Mise en tension quasi-simultanée des 4 poutres d'une même travée : écart de 20% de précontrainte totale additionnelle maxi entre deux poutres

Les manifestations régionales

- Retrait / fluage :
 - o Calculé au BPEL
 - o Avec prise en compte du phasage détaillé
- Charges d'exploitation :
 - o pont de 1ère classe,
 - o largeur roulable / chargeable = 12 m
 - o nombre de voies : 4
 - o coefficient de majoration dynamique : $\delta = 1.072$ (issu de la note VIPP69)

Combinaisons

Gex : les charges permanentes de l'ouvrage existant ;

Gadd : les charges permanentes dues aux renforts ;

Pex : la précontrainte existante ;

Padd : la précontrainte additionnelle ;

QR : les charges routières ;

QRC : les charges routières en phase chantier ;

QPRC : les charges particulières en phase chantier ;

X % : le taux de rupture des câbles existants

Y % : le taux de mise en tension de la précontrainte additionnelle

Principales justifications

- Aux ELS quasi-permanent, notamment à la mise en tension, compression du talon de la poutre inférieure limitée à $0.5 f_{c28} = 17.5 \text{ MPa}$
- Aux ELS Rares, concernant les ruptures admissibles, il nous a été demandé d'indiquer pour chaque cas de calcul le pourcentage (à 5% près) de ruptures admissibles en classe I
- Aux ELU fondamentaux : justification de la stabilité de l'ouvrage avec 70% de rupture de la précontrainte existante grâce au renfort du talon
- Aux ELU Accidentels : justification de la stabilité avec 100% de rupture de la précontrainte existante
- A la construction : non décompression du talon sous ELS fréquent, à l'exception de la phase de mise en oeuvre des bossages d'ancrage et déviateurs avant mise en tension partielle de la précontrainte additionnelle, pour laquelle un supplément de contrainte limité à -1.5 MPa est admis.

Modélisation de l'ouvrage

A l'aide du logiciel PONT développé par Bouygues TP

Constitués d'éléments poutres

- Composés de trois familles (nervures, béton de renfort, HA40) pour les poutres longitudinales
- Grillage de poutres pour le hourdis

Principe de calcul ELU

- Les charges supplémentaires propres aux ELU sont introduites en tant que charges court-terme
 - o Analyse générale simplifiée négligeant les redistributions nonlinéaires via le hourdis :

- Les déformations et sur les surtensions dans les câbles sont évaluées pour chaque poutre indépendamment, sous sollicitations fixes, en utilisant un logiciel de calcul non linéaire.
- La prise en compte du caractère composite de la section et notamment le calcul des contraintes et déformations du renfort de talon est obtenue par soustraction de deux états d'équilibre.
- Calcul non linéaire incluant les 4 poutres et le hourdis mené pour le cas de rupture à 70% à mi-travée :
 - Tenant compte de la fissuration et du comportement élasto-plastique du béton
 - Répartition transversale plafonnée par la capacité de moment plastique du hourdis

Coutures de talon

- Barres scellées à base de produits de scellement à base de liants hydrauliques
- Vérification du cisaillement le long de la surface de reprise à l'Eurocode 2
- Scellement du renfort de talon sur 1,50 m afin de limiter les surtensions de la précontrainte existante
- Longueur de scellement maximum 150 mm afin de ne pas risquer d'endommager les câbles et aciers existants

Renforcement carbone V2C

- Déficit de résistance à l'effort tranchant au droit des déviateurs
- Complément d'armatures verticales nécessaires vis-à-vis du renfort de bielle d'about en dehors de la zone d'ancrage
- Principales caractéristiques du renfort :

Autres vérifications ELU

- Ancrage de la précontrainte :
 - Clouage des barres suivant NF P 95-104 «Spécifications relatives à la technique de précontrainte additionnelle»
 - Justification de la diffusion des efforts de précontraintes suivant l'annexe 4 du BPEL
 - Renfort de la bielle d'about calculé au BAEL (Art. A,5,1,312)
- Non-déversement des poutres sous précontrainte additionnelle

Justifications locales

- Au droit des carottages :
 - Dimensionnement des compléments d'armatures potentiels à mettre en oeuvre dans les massifs d'ancrage

Les manifestations régionales

- Dimensionnement des renforts V2C éventuels à mettre en oeuvre au droit des déviateurs
- Justification des entretoises d'about
- Allongement du coffrage d'about
- Position des déviateurs

Justifications en phase provisoire

- Justification des appuis sous charges de pontons :
 - Vérification en portance des pieux
 - Vérification des semelles de piles
 - Justification des fûts de pile avec pris en compte des défauts de verticalité ainsi que des effets du second ordre
 - Vérification locale des fûts au droit des poutres de guidage
 - Vérification des chevêtres notamment en phase de hissage avec prise en compte d'armatures corrodées
- Justification des poutres vis-à-vis du bridage des pontons

Conclusions

- Une modélisation complète d'un ouvrage de précontrainte, tenant compte du vieillissement réel de l'ouvrage
- La prise en compte de ruptures de câbles désormais intégrée au logiciel PONT
- Une réalisation de plans détaillée permettant une adaptation au plus juste vis-à-vis des armatures existantes
- Un chantier à cycles pour lequel il a fallu anticiper

Présentation des méthodes

Olivier Monfray, Vincent Lefebvre, Bouygues

Les méthodes en avant-projet

Les besoins :

- Réalisation de massifs d'ancrages et de déviateurs
 - Conception de coffrages spécifiques manuyportables
- Accès pour pose précontrainte
 - Conception d'échafaudages adaptés
- Réalisation d'épaississement béton pour renforcement talon
 - Conception de coffrages spécifiques manuyportables
- Approvisionnement des moyens et matériaux en l'absence d'accès par la chaussée
 - Etude du cycle de réalisation des travaux et des modes opératoires spécifiques

Solutions imaginées :

Accès matériaux et matériels

1. Estacade à l'avancement pour accès et moyens de manutention pour approvisionnement

- Point fixe pour alimentation du béton
- Stockage des matériels et fournitures
- Point d'accès aux postes de travail (sapine ou ascenseur contre pile)
- Autonomie du chantier
- Livraison par voie maritime, ou par le dessus à des périodes définies

2. Plateforme :

- Plateforme pieds de pile et accès maritime suivant horaires marées et moyens de manutention pour approvisionnement

3. Plateforme autonome :

- Rendre la plateforme de travail autonome sur un cycle d'une travée

Platelage de travail

1. Solution cintre suspendu entre les 2 piles sur le chevêtre

- Console fixée sur pile à l'avancement
- Outil équipé de poutre télescopique ripable sous chaque poutre béton
- Accès par le bas ; plateforme console accrochée sur la pile + ascenseur 1 pile sur 2

2. Solution cintre suspendu entre les 2 piles sous le chevêtre

- Travée étalement simple autoélevatrice sur pile - console avec double carcan sabot sur pile
- Montage de l'ensemble platelage sous les 4 poutres
- Le platelage est transféré entre chaque travée après descente et pose sur ponton

3. Solution cintre suspendu entre les 2 piles sur le chevêtre

- Hissage par équipement de levage type treuil
- Mise en place des équipements à l'aide d'un ascenseur
- Le platelage est transféré entre chaque travée après descente et pose sur ponton

Les problématiques :

- Définition précise des plateformes de travail
 - o Évolution des plateformes en milieux marin et aérien
 - o Prise en compte de l'environnement (vent, eau, accès...)
 - o Optimisation des aménagements des plateformes
- Définition des matériels de hissage et mode opératoire
 - o Prise en charge des plateformes depuis la Loire
 - o Prise en compte de l'environnement (vent, eau, accès...)
 - o Accès pour mise en place

Les manifestations régionales

- Accès aux postes de travail
 - o Sur chevêtres de piles
 - o Sur plateformes
- Approvisionnement des matériaux et matériels
- Optimisation des coffrages
- Fiabilisation et optimisation du cycle

Les installations de chantier

L'estacade

Charges d'exploitation :

- Grue automotrice 50T
- Semi-remorque
- Toupie de béton

Les échafaudages

Réalisation des travaux des deux premières travées sur échafaudage de type Mills (tirant d'eau trop faible pour l'utilisation des pontons)

Les plateformes de travail : les pontons

Outil de navigation fluvial et maritime, capable d'être hissé par ses extrémités jusqu'à 48m de hauteur, de recevoir un chargement intérieur et extérieur, de recevoir du personnel pour exécuter les travaux de renforcement depuis le pont supérieur, et de recevoir du personnel dans le caisson pour la logistique et la gestion des travaux.)

Optimisation du chargement sur pont

- L'espace de travail est compté, chaque matériel a sa position défini
 - Les coffrages
 - Les échafaudages légers
 - L'outillage portatif
- Les matériaux sont stockés dans les engravures longitudinales
 - Armatures
 - Gaines de précontrainte
 - Tiges de précontrainte

Optimisation du chargement sous pont

- En partie inférieure on trouve
 - La partie base vie (réfectoire, cuisine, sanitaire)
 - Un magasin
 - Le matériel nécessaire à l'autonomie du ponton
 - Groupe électrogène
 - Fosses eaux usées
 - Citerne eau potable
 - Citerne carburant
 -

Les plateformes de travail : le hissage des pontons

Outil de levage fixé sur les chevêtres de piles permettant à l'aide de vérins et de câbles type précontrainte de hisser ou dé-hisser les pontons et les passerelles.

Mode opératoire spécifique de mise en place de l'ensemble de hissage

Les problématiques :

- Accès aux postes de travail
 - Sur chevêtres de piles
 - Mise en sécurité des postes de travail
- Mise en place des matériels
 - Implantation
 - Poutre métallique 3T
 - Vérins 1T
 -
- Hissage
 - Justifications (charges d'exploitation, vent, incidents...)
 - Accrochage des câbles
 - Transfert de charge
 - Mise en sécurité du poste de travail
 - Points d'arrêts et procédures de contrôles
 - Déhissage

Les plateformes de travail : la passerelle

Outil de navigation fluvial et maritime, capable d'être hissé par ses extrémités à 48m de hauteur, de recevoir un chargement extérieur, de recevoir du personnel pour exécuter les travaux de peinture et de mise en place des plats carbone collés.

Le déroulement des travaux

S. Braquehais - Bouygues

Principales quantités

219 000 scellements de barres HA à réaliser
 244 tonnes de précontrainte par câbles
 2 640 barres de clouage précontraintes
 2 300 m³ de béton coulés par petites quantités
 800 tonnes d'armatures HA
 6 700 manchons pour HA40

Le planning

Aléas du planning :

- Les intempéries :

Travail sur pontons et plateformes jusqu'à 70 km/H de vent maxi.

Accès nautique impossible pour la préparation du hissage lorsque la houle est supérieure à 30-40 cm et le vent supérieur à 50 km/H

Hissages des pontons et plateformes jusqu'à 50 km/H de vent

Houle inférieure à 30 cm pour l'engagement des pontons et des passerelles entre piles

- Marées :

Pour les opérations de hissage et de déhissage, besoin de la cote marine de 4,85 CMH (coef 44 environ) pour engager le ponton à l'échouage au dessus des semelles avant hissage ou pour le dégager après déhissage. Pied de pilote entre ponton et semelle de 35 cm.

Les manifestations régionales

Accès nautiques depuis l'estacade dépendant de la marée (préparation hissage)

Les principaux intervenants

- Fourniture et pose d'armatures : WELBOND
- Perçage pour aciers à sceller : Normandie Perfo Service
- Lamanage : AMS
- Application de la peinture LHM : ROTH
- Travaux haute pression : THP
- Fourniture béton BPE : LAFARGE
- Réalisation des passerelles d'accès : CLRM

Les contrôles

H. Davias CETE Ouest – LR d'Angers

Bétons

Différentes formulations de béton proposées par le producteur de béton en fonction des parties d'ouvrage et des exigences du CCTP et du fascicule 65 :

* renforts des talons de poutres et bielle d'about :

BPS C40/50 XS3 S3 D10 CEMII 42,5 PM CI0,2

* massifs déviateurs et ancrages de la précontrainte :

BPS C40/50 XS3 S4 D10 CEMII 42,5 PM CI 0,2 et

BPS C40/50 XS3 S4 D22 CEMII 42,5 PM CI 0,2

Classe d'exposition en milieu marin (XS3) demandant un ciment du type PM et un taux de chlorure à 0,2% du poids de ciment. Dosage en ciment de 410 kg avec 25 kg de fumée de silice (Rhéomac SF 920D).

Granulométrie pouvant être réduite à 10 mm pour la mise en place dans un coffrage réduit avec une forte densité d'armatures.

Les critères d'acceptation lors des convenances de béton

- La consistance du béton (adaptée en fonction du temps de transport prévisible et des moyens de mise en oeuvre) sera considérée comme conforme, si au bout d'un temps égal au temps de transport majoré de 30 minutes (pour tenir compte des temps d'attente et de déchargement), la consistance est dans la fourchette spécifiée (S3 « 100/150mm » ou S4 « 150/200 mm »).

A noter que la rhéologie d'une formule de béton peut varier très fortement si la température augmente, ce qui a conduit à envisager une nouvelle convenance, avec modification de l'adjuvantation, en début de période chaude.

- Les résistances à la compression exigées par le CCTP sont de 25 MPa à 2 j, 30 MPa à 7 j et 40 MPa à 28 j.

- Les formules testées lors des épreuves de convenance respectent les critères de conformité et ont été déclarées conformes.
- Mais lors des premiers bétonnages de massifs, la formule en Dmax 22 mm n'a pas été retenue suite à des problèmes de mise en oeuvre de béton dans le coffrage.

Scellements, précontrainte

Scellements des armatures HA14

- Avis sur matériaux utilisés (armature HA 14 B500 ; mortier et résines de scellement)
- Avis sur procédure « Essais d'arrachement »
- Référentiels
 - o CCTP
 - o PAQ
 - o NF EN 1504-6 : 2006
 - o FD P 18-823 : 2011
 - o NF EN 1881 : 2007
- Objectif : comparer les deux types de produits de scellement (mortier Pagel V1 ; résines SPIT EPOBAR et BASF MASTER FLOW 920)
 - o Essais à 7, 14 et 28 jours pour le mortier : effort de traction de 67 kN pendant 15 minutes puis 77 kN pendant 5 minutes (résultats hétérogènes)
 - o Essais à 1 et 28 jours pour la résine, dans les mêmes conditions
- ➔ Choix de la résine SPIT EPOBAR (rupture des aciers au-delà du palier de 77 kN après 1 jour).

Barres de précontrainte Ø 40 mm Macalloy 1030 pour clouer les massifs d'ancrage et déviateurs

- Avis sur matériaux utilisés (barres Macalloy 1030 ; coulis Superstresscem)
- Avis sur procédure « Précontrainte de clouage »
- Référentiels
 - o CCTP
 - o PAQ
 - o Fascicule 65

Barres mises en tension à l'aide de vérins hydrauliques : effort résiduel de 790 kN pour massifs d'ancrages et de 794 kN pour les déviateurs.

- Contrôle de la mise en tension (présence CMP ; surlongueurs barres ; Rc cube béton > 35Mpa ; conformité des matériels ; respect des paliers ; valeurs attendues)
- Contrôle du pesage 7 jours après mise en tension dans le cadre de la convenance (présence CMP ; conformité des matériels ; respect des paliers ; valeurs résiduelles attendues)

Les manifestations régionales

- Contrôle de l'injection (mise en place des capots)

Précontrainte additionnelle constituée de 4 câbles répartis de part et d'autre de l'âme de chaque poutre (Câble constitué de 8 torons de type T15S gainés graissés. Torons positionnés dans une gaine en PEHD injectée au coulis de ciment avant la mise en tension).

- Référentiels
 - o Fascicule 65 du CCTG
 - o PAQ de l'Entreprise
- Avis sur procédure « Précontrainte longitudinale »
- Avis sur matériaux (torons ; gaines PEHD ; coulis ; cire pétrolière)
- Des essais de convenance ont été réalisés sur le coulis de ciment Superstresscem conformément à l'EN 445 (fluidité, exsudation), l'EN 446 (procédure d'injection).
- Suivi des opérations d'injection des gaines en PEHD avec le coulis SuperstressCem
- Pendant les opérations de mise en tension, contrôle des matériels utilisés par l'Entreprise (fiches d'étalonnage des manomètres de contrôle ainsi que les fiches de contrôle des vérins pour les mesures des coefficients de transmission).
- Contrôle des coefficients de transmission à l'aide d'un système d'acquisition de données COMET II.
- Suivi des opérations d'injection des capots avec la cire pétrolière INJECSELF.
- Mesure du coefficient de transmission du câble n°2 de la poutre D en travée S24/S25 à 0,955 pour une valeur théorique de 0,940 et conforme à la fourchette comprise entre 0,91 et 0,97.

Matériaux composites

Renforts par matériaux composite carbone

- Renforcement à l'effort tranchant par 6 bandes de 0,30 m de largeur, de part et d'autre de l'âme des poutres. Ancrage des bandes par plaques d'ancrage, en parties inférieures et supérieures.
- Référentiels :
 - o CCTP / Plans DCE
 - o PAQ / Notes de calculs et plans d'exécution
 - o Recommandations provisoires AFGC (Février 2011) / Avis Technique V2C

Rôle du Contrôle Extérieur (mission conjointe DL Autun et DL Angers)

- Le Département Laboratoire d'Autun assure, lors des épreuves de convenances, la formation du personnel du DL Angers puis, assiste, lors d'interventions ponctuelles, le personnel du DL Angers.
- Avis sur procédure « Renforts par matériaux composite carbone »

- Epreuves de convenances (juillet 2011 et février 2012)
- Contrôles ponctuels de la mise en oeuvre du renforcement par matériaux composites carbone

Epreuves de convenances

- Vérifier la présence de personnel qualifié notamment le CARC (Chargé d'Application des Renforts Composites) et de son équipe
- Vérification des produits appliqués (tissu fibres carbone C-Sheet 240 300g/m² ; résine S3D ou S4D si T > 30°C ; platines d'ancrages...).
- Difficulté d'avoir un marquage de dates sur les composants résine.
- Vérification de la préparation du support (cohésion / meulage / aspiration) et des conditions de mise en oeuvre (T ambiante / Hygrométrie / Point de rosée / T support)
- Suivi de la mise en oeuvre selon les prescriptions de l'AT du procédé V2C. Lorsque les températures ambiantes sont basses, veiller à maintenir une température suffisante pendant la durée de polymérisation.
- Contrôle par caméra Infra-Rouge après collage du tissu. Bien maroufler au niveau des angles rentrants.
- Essais de traction directe (NF EN 1542 : 1999) sur pastilles métalliques collées sur les renforts composites. Rupture > 1,5 Mpa et dans béton.
- Essais de dureté shore D sur résine (pour S3D à 23°C, 78±4 à 24h)
- Essais de DSC (Analyse Différentielle à Balayage) sur résine pour détermination de la température de transition vitreuse Tg. Pas d'indication de valeur de Tg dans l'AT du procédé V2C ni dans les recommandations provisoires de l'AFGC.
- Suivi de la pose des platines d'ancrage. Attention à la position des rondelles isolantes (entre rondelles et platine inox).

Protection des bétons

Teneur en chlorures (DLRC Angers et DL Saint-Brieuc)

- Essais par prélèvements de poudre de béton suivant la procédure OA_ED_E2_2_1_b RLPC (prélèvements par tranches de 10 mm, jusqu'à 50 mm de profondeur)
- Mesure du PH selon la NF T 90-008
- Teneurs en chlorures (libres par rapport à la masse de ciment / totaux par rapport à la masse de béton) selon la méthode AFPC-AFREM
 - ➔ Présence de chlorures, dans les talons et les âmes des poutres, dépassant localement le seuil critique de dépassement des armatures et confirmée par les mesures de potentiel de corrosion

Les manifestations régionales

Inhibiteur de corrosion

- Impossibilité de déchlorurer par méthodes électrochimiques en raison de la fragilité à la corrosion fissurante sous tension des armatures de précontraintes KA -> Inhibiteur de corrosion
- Parties traitées : sous-faces, faces latérales et inclinées des talons des poutres
- Avis sur choix du produit : Sika FerroGard 903+ (molécules organiques) faisant l'objet de références en matière d'essais et d'applications (avis de la commission construction bâtiment du CEFRAFOR)
- Epreuves de convenance pour déterminer la concentration du produit à appliquer (300g/m² en sous-face / 400g/m² sur les faces latérales et inclinées), les conditions d'application (au rouleau et en 5 passes) et mesurer la pénétration du produit au sein du béton (essais par chromatographie ionique pour mesurer la pénétration ainsi que la concentration de l'inhibiteur au niveau des armatures qui devra être au moins égale à 100 ppm)

Revêtement de protection LHM

- Recouvrement de l'intégralité de la surface des poutres y compris les zones renforcées par matériaux composites
- Référentiels
 - o CCTP
 - o NF EN 1504-2 : 2005 / GA P18-902 : 2004 / Guide STRES « Protection des bétons » / Guides techniques LCPC (1996 et 2002)
 - o Avis sur choix du produit en fonction des critères d'exigences du niveau 1 du GA P18-902 (protection contre l'eau, protection vis à vis de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone), de la compatibilité entre les composants du système de protection (inhibiteur / ragréage / LHM) et de la garantie exigée de 10 ans contre la pénétration des chlorures
 - ➔ SikaTop 107 Protection en fournissant références similaires d'applications
- Réception des supports (cohésion / état avec, ou sans, présence de resurfaçage au mortier SikaTop 121)
- Vérification des produits appliqués et des conditions de mise en oeuvre (T support, T produit / T ambiante / Hygrométrie > 30% / Point de rosée)
- Suivi de la mise en oeuvre en 2 couches, par projection (DPU / contrôle épaisseur du film humide)
- Contrôle de l'adhérence

Mesure des diagrammes de déformation

Cette instrumentation et son suivi ont pour objectif de déterminer les diagrammes des déformations des poutres lors des opérations de mise en tension des armatures de précontrainte.

Les diagrammes obtenus comparés au diagramme théorique issu de la note de calculs permettront de vérifier si les contraintes se répartissent comme prévu et si cette phase de renforcement est efficace.

- 12 sections de poutres instrumentées, à l'avancement des travaux
- 5 jauges (extensomètres 120 Ohms montés en ¼ de pont) réparties sur la hauteur d'une section de poutre retenue

Rôle du Contrôle Extérieur (CETE Sud-Ouest / LR Bordeaux) :

- Avis sur procédure
- Avis ponctuel sur les résultats de l'instrumentation du Contrôle Interne de l'Entreprise
- Instrumentation ponctuelle réalisée par le Laboratoire Régional de Bordeaux (prochaine intervention le 24 mai)

L'instrumentation future

F. Lanquette, Setec

1. Instrumentation durant les travaux

- Suivi topométrique

But

- Suivi de l'évolution des flèches des poutres VIPP
- S'assurer de leur bon comportement pendant les phases critiques du renforcement: coulage des massifs, du renfort talon, mise en précontrainte

Moyens

- Système de pots de nivellement hydrostatique
- Suivi permanent des 4 poutres, en 5 points
- Alertes SMS en cas de dépassement de seuil
- Flèches aux phases critiques (coulages massifs, mise en précontrainte à 20%) faibles (millimétriques)
- Mesures toutes les 30 min
- Pas de fait majeur constaté jusqu'à présent

- Suivi des déformations

But

- S'assurer du bon comportement des poutres pendant leur mise en précontrainte
- Bonne répartition des contraintes dans une section de poutre

Moyens

- 5 jauges de déformations réparties sur une section de poutre
- 12 sections instrumentées au total

Les manifestations régionales

2. Instrumentation en service

- Suivi des déformations

But

Surveiller l'évolution des déformations du talon des poutres

Moyens

- 12 poutres instrumentées sur 10 travées (de S28 à S18)
- Cordes vibrantes (extensomètres) fixées en sous-face des talons
- Correction des déformations en fonction de la température

- Suivi acoustique

But

Surveiller les ruptures des fils de précontrainte

Moyens

- 12 poutres instrumentées sur 10 travées (de S28 à S18)
- 8 capteurs par poutre
- Système canadien de Pure Technologies, sous-traitant d'Argotech

- Suivi météorologique

But

Accompagnement de l'instrumentation de service: interprétation des données collectées en fonction des conditions météo

Moyens

- 3 Anémomètres avec une sonde de température sous abris
- 3 cannes de température de 20 cm à 4 points de mesure

Les apports du viaduc de St Nazaire dans l'approche aérodynamique des ouvrages

Gérard Grillaud, CSTB

En 1974 le pont de Saint Nazaire est le record mondial de portée haubanée: 404 m

Depuis il a été dépassé par Annacis, Normandie (856 m), Tatara, Ting Kau, Stone Cutters, Sutong, Russki (1104 m)

Le pont de Saint Nazaire est l'ouvrage qui a lancé le domaine de l'aérodynamique des ponts en France. C'est aussi l'ouvrage qui a servi « d'étalon » pour calibrer les approches de calcul au vent turbulent

Pour des portées supérieures à 400 m, le vent est le paramètre le plus dimensionnant des ouvrages haubanés.

Pris en compte dans la conception (J. C. Foucriat, CFEM) en choisissant un tablier caisson et des pylônes en « A » -> grande raideur, en particulier en torsion.

Etat de l'art en France: Pont de Tancarville, étude du flottement couplé flexion verticale/torsion en s'inspirant (à tort) des approches aéronautiques (Y. Rocard)

Prise en compte du détachement tourbillonnaire à partir des règles NV -> faible/charges d'exploitation

1ère étude en soufflerie au Laboratoire Eiffel (M. Romani) en 1972 consacrée aux coefficients aérodynamiques (charges de vent): maquette très instable, résultats fluctuants.

Visualisations par technique de bulles de savon: détachement tourbillonnaire ?

Le détachement tourbillonnaire: tourbillons alternés dans le sillage des corps élancés à faible allongement dans la direction du vent.

Coïncidence de la fréquence de détachement des tourbillons avec celle d'un mode propre de la structure -> possibilité de comportement oscillatoire perpendiculairement au vent

Recherche de solutions:

Idée des déflecteurs, en concertation avec le SETRA, contacts SNIAS, Dassault (calculs statiques et dynamiques) ONERA (Szechenyi-Loiseau, 1973)

Essais en soufflerie sur montage en « vibrations forcées », oscillations de flexion verticale, de torsion, des deux combinées à amplitudes et fréquences variables. Force aérodynamiques déduites de couronnes de mesures de pressions synchrones. Identification des termes en phase avec le déplacement et la vitesse de déplacement pour en déduire les raideurs et amortissements aérodynamiques, puis les termes de couplage coefficients aéroélastiques (Scanlan ou Küssner)

Ces coefficients permettent ensuite de prédire le comportement du pont vis-à-vis du détachement tourbillonnaire et du flottement.

A l'étranger avant 1970:

- 1er pont suspendu sur la Severn,
- Etudes UK (Scruton, Walshe), flottement torsion pure,
- Réponse au vent turbulent, AG Davenport, 1962
- Pont de Lillebaelt, Danemark, 1966, 1ère application déflecteurs
- Coefficient aéroélastiques R. H. Scanlan, 1969 (méthode des oscillations libres)

L'après construction: développement des méthodes de calcul au vent turbulent, le pont de Saint-Nazaire a servi de laboratoire échelle 1 (CSTB) Exemple du calcul de l'accélération verticale du tablier:

Les manifestations régionales



Anémomètres 3D

Depuis près de 25 ans le CSTB a développé les techniques d'étude du comportement des ponts au vent

Références grands ponts : Normandie, Millau, Iroise, Rouen, Bacalan, Rion-Antirion, Vasco da Gama, Sikierkowski, Jean-Paul II, Assouan, Baluarte, Quetzalapa, Korabelny, Mourom, Phu-My, Tabarly, Chambal, Térénez, Golden Horn, Bouregreg, Recouvrance, Kwanza, Russki

Procédures Expérimentales:

- Sections de tablier
- Etude aéroélastiques partielles
- Maquettes complètes
- Réduction des vibrations
- Comportement dynamique des haubans

Maquette sectionnelle de tablier monté sur banc dynamique



- Stabilité et coefficients aéroélastiques
- Détachement tourbillonnaire
- Effets d'admittance
- Coefficients aérodynamiques
- Optimisation

Optimisation aérodynamique d'un tablier bi-poutre: combiner.. des écrans centraux...+ des corniches

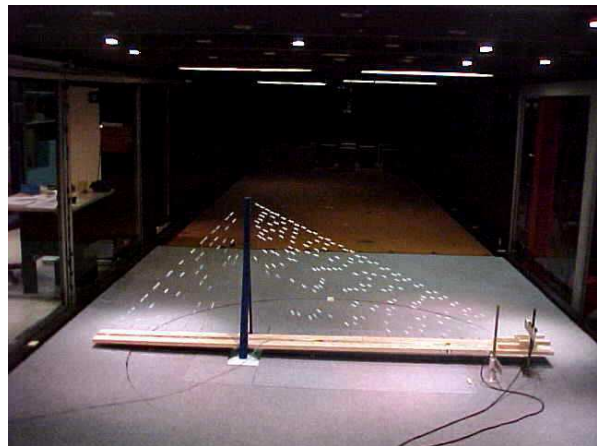
Maquette à fils ou tubes tendus



- Déformées modales des modes fondamentaux
- Réponse mode par mode

Les manifestations régionales

Maquette aéroélastique complète



Mesure directe de la réponse

Aujourd'hui, le même pont ?

- études aérodynamiques engagées plus tôt
- tablier caisson ou bi-poutre ?
- meilleur allongement (rapport largeur/épaisseur)
- haubans optimisés: amortisseurs, gaines anti-pluie