

13 octobre 2009 à Montpellier

La problématique des VIPP : l'exemple de l'ouvrage 1005 sur l'A9 du réseau ASF

La délégation Méditerranée de l'AFGC, en partenariat avec la société des Autoroutes du Sud de la France (ASF), a organisé le 13 octobre 2009, à Montpellier, une conférence et visite technique consacrées à la problématique des VIPP (Viaduc à travée Indépendante à Poutres Précontraintes par post-tension), en présentant notamment le cas de l'ouvrage 1005 d'ASF.

Cette manifestation a remporté un franc succès en attirant notamment plus de 100 personnes, vivement intéressées par cette problématique qui concernent bon nombre de maîtres d'ouvrages et gestionnaires de ces ouvrages à problèmes.



Rappel du programme

8h45 Introduction et présentation de l'AFGC Méditerranée

Jacques Resplendino (AFGC)

9h00 Présentation de la problématique des VIPP - Démarche du guide LCPC

Bruno Godart (LCPC)

9h30 Les études de risque sur les ouvrages du Réseau Routier National non concédés : VIPP, buses métalliques

Jean-Claude Hyppolite (SETRA)

9h45 Analyse de la criticité des VIPP - Synthèse de l'étude LCPC/ CETE pour l'ASFA

Sylvain Lopez (ASF)

10h00 Présentation de la problématique des VIPP et des enjeux pour ASF

Michel Trains (ASF)

10h20 Organisation d'ASF pour la problématique de VIPP (Gammagraphies, Reconnaissances physico-chimiques, recalculs, etc.)

Hervé Guérard (ASF)

10h45 Les investigations réalisées et la problématique de la démarche d'investigations physico-chimiques

Christophe Raulet (DIADES)

11h30 Les reconnaissances physico-chimiques de l'OA 1005

Christophe Carde (LERM), Miche Evariste (SEDOA) et Bernard Tonnoir (CETE Lille)

12h 00 Les mesures mises en œuvre par ASF suite aux découvertes de l'état des câbles

Hervé Guérard (ASF)

12h15 La problématique d'exploitation, les mesures d'urgence et les travaux réalisés

V. Meyer (ASF - M. Oeuvre)

12h45 Le suivi acoustique

Alexandre Chaperon (ADVITAM)

13h00 Déjeuner sur place



14h30 Les études d'exécution du renforcement

Michel Boy (ARCADIS)

15h00 Les travaux de renforcement par précontrainte additionnelle et tissus composites

C. Schmitt et P. Consalvi (FREYSSINET)

15h30 Discussion - Clôture des conférences - Organisation des visites de chantier

15h45 Visite du chantier de renforcement par groupe de 25 personnes

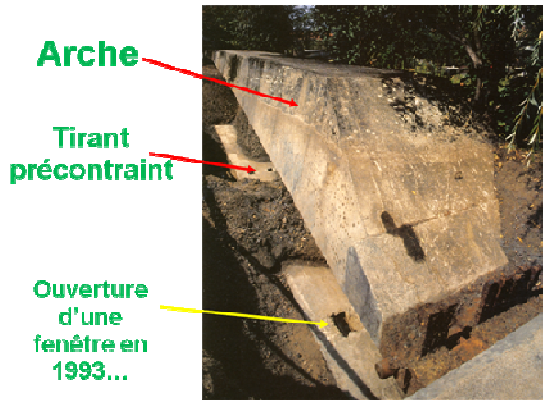
17h30 Fin de la manifestation

Synthèse des conférences

Présentation de la problématique des VIPP - Démarches du guide LCPC - Bruno Godart

Bruno GODART a présenté un rapide historique de la précontrainte, des principes de conception des VIPP et les principaux défauts particuliers constatés sur ce type d'ouvrages.

Le pont de Veudre sur l'Allier construit par Eugène Freyssinet en 1907 pour étudier le fluage du béton a été cité comme exemple de la durée de vie possible d'un câble de précontrainte.



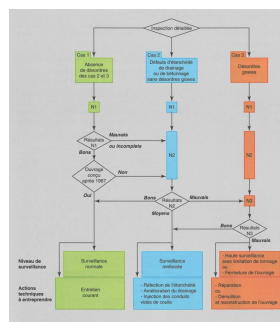
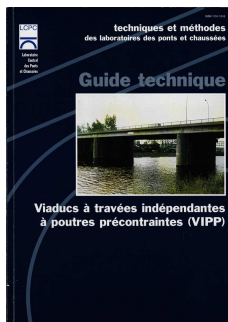
Pont de Veudre

Une étude expérimentale faite sur cet ouvrage en 1993 a montré un bon état de conservation des câbles qui étaient simplement disposés dans des rainures remplies de sable et cachetées avec soin par un mortier hydraulique.

On note également l'absence de chape d'étanchéité sur la face supérieure du tirant qui est resté enterré dans le sol pendant longtemps. **C'est la preuve expérimentale qu'une structure en béton précontraint peut durer plus de 100 ans.**

Ce type de construction a été fortement utilisé après la seconde guerre mondiale dans les années 1946 à 1960, qui a marqué l'essor des VIPP. D'autant plus que grâce à la réalisation de fils à haute limite élastique, la précontrainte prendra une ampleur industrielle en 1939, comme l'illustre le Pont de Luzancy sur la Marne construit entre 1941 à 1946.

Bruno GODART a ensuite présenté la genèse du guide LCPC ainsi que la méthodologie de diagnostic en 5 étapes élaboré dans le cadre de la rédaction de ce guide, en présentant notamment les techniques d'investigations possibles (gammagraphie, radar, arbalète, courburemètrie, surveillance acoustique, ...).



Guide LCPC et organigramme de démarche

Les manifestations régionales

Les défauts de conception concernent principalement les choix de dispositions constructives ou de technique inadaptée (par exemples : poutres préfabriquées sur site, la construction en fraction avec de nombreuses reprises de bétonnage) et également le choix de matériaux peu durables.

Il en résulte de la fissuration et une fragilisation de l'ouvrage.

On note aussi, par une absence de chape d'étanchéité et une mauvaise injection des conduits de précontrainte, des défauts responsables de corrosion, ce qui mène à un manque de ductilité structurelle avant rupture.



Venue d'eau active dans une fissure en talon de poutre



Défaut typique sous un talon de poutre dû à des difficultés de bétonnage



Exemple de fils rompus par corrosion sous contrainte



Corrosion généralisée de câbles

Certains VIPP présentent des déficits importants de précontrainte dus à la corrosion et/ou la rupture de fils/torons. Ces défauts ne peuvent pas être détectés par une inspection visuelle ni par des méthodes de contrôle non destructif (CND) pour évaluer l'état global de conservation des câbles de précontrainte et ainsi la capacité portante résiduelle.

Dans ces conditions, la question posée est de savoir comment évaluer la portance des ponts de type VIPP ?

En ce qui concerne la problématique de l'évaluation des VIPP, la méthodologie du guide du LCPC propose une démarche en 5 étapes :

- **Étape 1 : Analyse du dossier d'ouvrage**

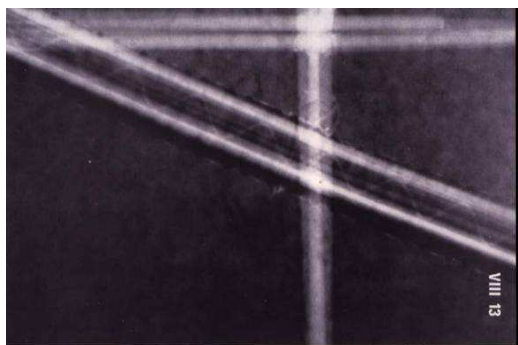
Analyse préliminaire du risque : cette analyse est basée sur des informations générales comme la date de construction et l'hypothèse de construction. Il y a également les informations sur la construction, les procédés, les types d'aciers utilisés et les techniques.

- **Étape 2 : Inspection détaillée**

Cette phase est la poursuite de l'analyse préliminaire du risque, notamment le risque de corrosion des câbles. Il s'agit également de détecter les désordres comme les fissures longitudinales, transversales et verticales sur l'ouvrage, des défauts de cachetages et les tâches de corrosion sur les parements des poutres.

- **Étape 3 : Investigation niveau N1**

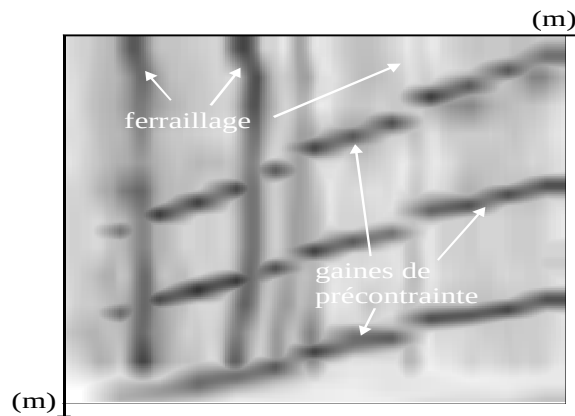
Cette phase consiste à évaluer la quantité d'injection des conduits de précontrainte et ceci est effectué par la méthode **gammagraphie** ou **radiographie**. Cette méthode permet de détecter la présence ou l'absence de coulis mais elle ne permet pas de détecter la présence de corrosion des armatures et câbles.



Exemple de cliché gammagraphie

Les manifestations régionales

On peut également faire appel à la méthode **radar** pour vérifier le positionnement des gânes et la conformité du ferrailage passif, et la méthode **impact-écho** pour détecter des manques importants de coulis.



Cartographie radar réalisée à 1,5 GHz à l'aide de profils parallèles et perpendiculaires à l'âme

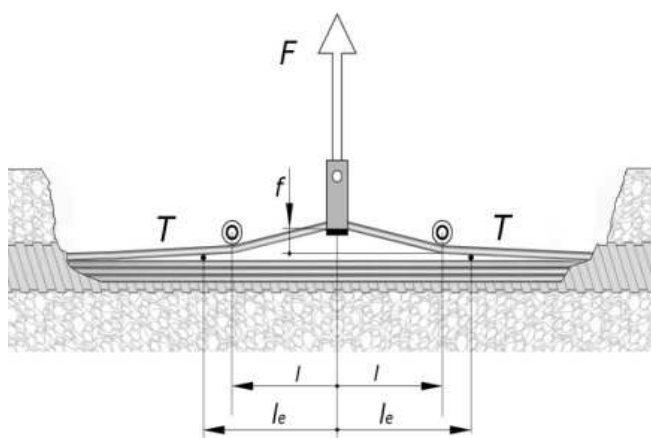
Selon l'importance du manque de coulis détecté pour un pourcentage donné de coulis, le guide LCPC conduit vers une surveillance normale, soit vers le niveau d'investigation N2.

- **Étape 4 : Investigation de niveau N2**

Cette phase consiste à évaluer quantitativement la précontrainte par l'ouverture des fenêtres pour inspecter l'état des câbles précontraints. Après investigation, si les résultats de la corrosion est supérieure ou égale à 5-10%, les investigations de niveau N3 sont fortement recommandées.

- **Étape 5 : Investigation niveau N3**

Cette phase permet d'évaluer la capacité portante de l'ouvrage à travers différentes méthodes d'auscultation afin de pouvoir effectuer un recalcul de l'ouvrage. Pour cela différentes méthodes ont été mises en place, notamment la méthode de l'**arbalète**, la méthode de **libération des contraintes**, la **courbémétrie** et la surveillance **accoustique**.



Principe de la méthode de l'arbalète



Courburemètres en place sur une poutre de VIPP



Capteur acoustique

Suite à ces investigations complémentaires, divers types de traitement sont possibles, notamment : un renforcement par composite ou par des aciers additionnels, un renforcement précontraint, une reconstitution de la chape d'étanchéité, ...

Bruno GODART a ensuite terminé sa présentation par quelques exemples de renforcement.

Les études des risques sur les ouvrages du Réseau Routier National (RRN) non concédé : VIPP, buses métallique - Jean-Claude Hyppolite

Le SETRA a développé sur le réseau routier national les notions d'étude des risques en 2008.

120 VIPP, 1030 Buses métalliques, 440 massifs en terre armée et 500 ouvrages affouillables ont été recensés et sont considérés comme ouvrages sensibles du RRN.

J.C. HYPOLITE a présenté la méthodologie et les risques associés qui sont déterminés par la connaissance de l'aléa, la vulnérabilité à l'aléa considéré et la gravité des conséquences.

Une méthodologie a été mise en place concernant les VIPP, par la reprise de la méthode LCPC/CETE développée pour le compte de l'ASFA en 2006 sur les VIPP du réseau autoroutier concédé.

Les différentes étapes nécessitent de :

- recenser les ouvrages concernés,
- identifier les aléas à étudier et leurs probabilités,

- lister les facteurs de vulnérabilité,
- évaluer la gravité des conséquences,
- calibrer les seuils (échantillon témoin),
- mettre au point les outils d'acquisition et de traitement,
- informer de la démarche et former le personnel.

L'application aux buses métalliques a également été largement présentée.

Cette démarche permet in fine de limiter les risques en optimisant les méthodes de surveillance et de travaux tout en ciblant les ouvrages sensibles d'un parc prédéterminé et inventorié.

Analyse de la criticité des VIPP- Synthèse de l'étude LCPC/CETE pour l'ASFA - Sylvain Lopez

L'ASFA (association qui regroupe les sociétés d'autoroutes concédées) a missionné le groupement LCPC/CETE pour réaliser de Novembre 2005 à Mai 2006 une étude sur l'analyse de la criticité des 116 VIPP identifiés sur le réseau autoroutier concédé.

Sylvain LOPEZ a présenté cette étude qui avait notamment pour objectifs de mieux connaître la fiabilité, les risques liés à la conception, à la dégradation des matériaux sur ces ouvrages.

Cette étude, basée sur une démarche de sûreté de fonctionnement, comprend les 4 étapes suivantes :

➤ Analyse Fonctionnelle Interne (AFI) :

Sélection des données les plus significatives pour les phases ultérieures (APR, QR) avec 7 thèmes et 48 critères retenus pour l'analyse par ouvrage.

➤ Analyse Préliminaire de Risques (APR) :

Identification des défauts susceptibles de réduire la performance puis classement des ouvrages à partir de critères qualitatifs.

➤ Quantification des Risques (QR) :

Quantifier la criticité en terme de résistance

$$I = \frac{\text{Résistance}}{\text{Sollicitation}}$$

$\nearrow$
 $\searrow$

ELS : aptitude au service

ELU : sécurité structurale

Différentes configurations ont été explorées :

- Évolution du profil en travers (initial, actuel, réduit)
- Évolution du règlement de calcul (matériau, charges)
- Prise en compte de charges réduites (précontrainte résiduelle nécessaire)

➤ Analyse détaillée de la criticité :

Des niveaux de criticité à l'ELU (robustesse) ont été définis en regard de l'état des ouvrages.

L'analyse la criticité ainsi définie a pu être réalisée pour l'ensemble du parc de VIPP de l'ASFA.

Sylvain LOPEZ a terminé sa présentation en présentant le cheminement de l'OA 1005 dans l'ensemble de la démarche d'analyse de criticité.

Présentation de la problématique des VIPP et des enjeux pour ASF - Michel Trains

Le réseau ASF est composé de :

- 2630 kms
- 3900 OA
- 2 730 766 m² de tablier



Réseau ASF

Les VIPP du réseau ASF comprennent :

- 57 VIPP pour 116 sur autoroutes concédées
- 168 157 m² de tablier, soit ≈ 2% du parc total

Michel TRAINS a présenté la démarche d'ASF qui, compte tenu du nombre important de VIPP, s'est engagé résolument dans la détermination de l'état interne de ses ouvrages.

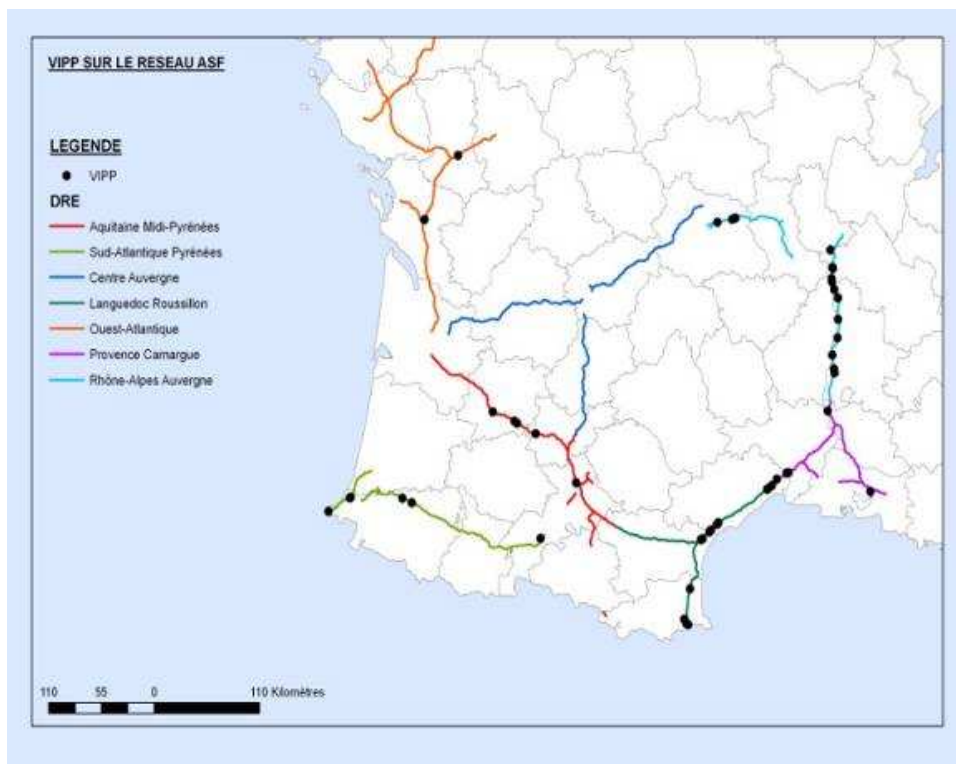
L'enjeu d'ASF est de s'assurer de la sécurité des clients et de la continuité du trafic dans des conditions de fluidité acceptable.

La démarche passe ainsi par une recherche des ouvrages à problèmes.

D'après les études de criticité réalisées pour le compte de l'AFSA et d'après des études internes réalisées pour ASF par ADVITAM et LIGERON, ASF a retenu 37 ouvrages qui ressortent comme les plus risqués.

Sur les 37 ouvrages retenus, des diagnostics physiques et des recalculs ont été réalisés, sachant que durant le diagnostic physique un renforcement d'urgence peut être décisif (exemple de l'OA 1005).

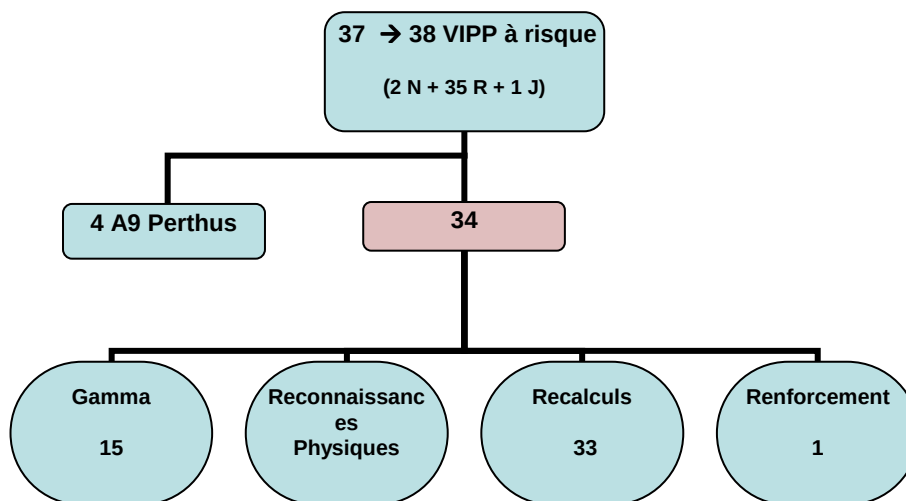
On note aussi sur les 20 autres VIPP non-critiques que des diagnostics de toute ou partie d'ouvrage sont envisagés.



VIPP sensibles sur le réseau ASF

Organisation des ASF - Hervé Guérard

Hervé GUERARD a présenté l'ensemble de la démarche mise en œuvre par les ASF.



Décomposition des orientations données

Il a ensuite présenté les contraintes de l'opération :

- 13 districts
- Travaux programmés en 2008 et 2009
- Jours où neutralisation impossible
- Quelques OA prioritaires
- Accès par-dessus / par-dessous
- Contraintes jour / nuit

Les plannings des contraintes prévisionnelles ont été joint aux A.O. et marchés.

				2008																																														
			Accès	aout				sept.				oct.				nov.				déc.				janv.				fév.				mars				avril				mai										
				32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23			
Agen	999	Baïse	Neutralisation voies jour																																															
			Neutralisation voies nuit																																															
			Accès par en-dessous																																															
1518	Costes Pelades	Neutralisation voies jour																																																
		Neutralisation voies nuit																																																
		Accès par en-dessous																																																
1	Bidassoa	Neutralisation voies jour																																																
		Neutralisation voies nuit																																																
		Accès par en-dessous																																																
284	Nive	Neutralisation voies jour																																																
		Neutralisation voies nuit																																																
		Accès par en-dessous																																																
294	Barthes & SNCF	Neutralisation voies jour																																																
		Neutralisation voies nuit																																																
		Accès par en-dessous																																																
607	gave de Pau & SNCF	Neutralisation voies jour	4	3	4	4												4	4	4	4	4	4																											
		Neutralisation voies nuit		3																																														
		Accès par en-dessous																																																
724	gave de Pau	Neutralisation voies jour	4	3	4	4												4	4	4	4	4	4																											
		Neutralisation voies nuit		3																																														
		Accès par en-dessous																																																
2288a	St Vidian	Neutralisation voies jour																																																
		Neutralisation voies nuit																																																
		Accès par en-dessous																																																

Extrait des plannings de contraintes indicatives

Il a ensuite présenté l'ensemble de l'organisation mise en place par ASF, les acteurs (AMO, laboratoires, bureaux d'études) retenus pour les différentes phase de l'opération (gammaglyphies, reconnaissances physiques et chimiques, recalculs) et les montants associés.

Il a présenté les 6 phases de calculs définies :

- 1^{ère} Phase : Calcul initial règlementaire (BAEL/BPEL)
- 2^{ème} Phase : Calcul avec géométrie mesurée
- 3^{ème} Phase : Calcul avec caractéristiques mesurées des matériaux
- 4^{ème} Phase : Scénarios de rupture de câbles
- 5^{ème} Phase (TC) : Calcul avec charges roulantes mesurées
- 6^{ème} Phase (TC) : AVP de renforcement par tissu composite.

Hervé GUERARD a terminé sa présentation en présentant la forte implication du RST :

- Comité de suivi SETRA/LCPC
 - Créé en 2007
 - Avis sur points techniques / Conseils sur orientations / Echange d'expériences
- 3 CETE en AMO études (SO, Est, Méd)

- Expérimentation Impact-écho sur un ouvrage (CETE Lyon)
- Assistance SETRA pour calculs phase 5 (Pollux)
- 3 CETE impliqués dans les marchés de diagnostic :
 - Gammaglyphies : CETE de Lyon
 - Arbalètes : CETE Nord-Picardie + CETE Méditerranée

Les investigations réalisées et la problématique de la démarche d'investigations physico-chimiques - Christophe Raulet

Dans le cadre de la continuité de l'étude LCPC / CETE pour le compte de l'ASF, une méthodologie et une approche pragmatique des problèmes liés à la sensibilité des ouvrages de type VIPP (37 VIPP ; 71 tabliers ; 866 poutres ; 8134 câbles) a été souhaitée par ASF.

Ch.RAULET a présenté l'ensemble de la démarche méthodologique proposée aux ASF en rappelant les objectifs :

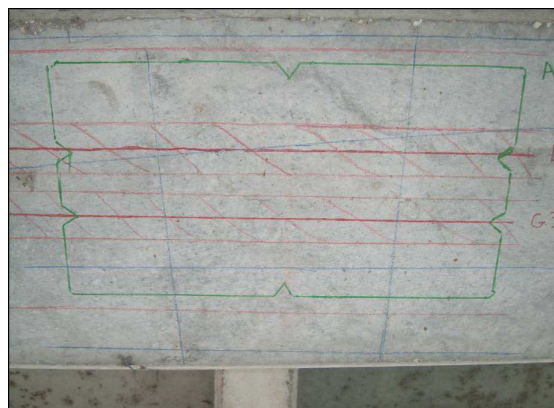
- Définir des investigations ad-hoc permettant de définir in fine les « juste-travaux » à réaliser, en alimentant au préalable de façon fiable les modèles de calcul, et les différents niveaux de recalculs à réaliser,

- Pouvoir définir, estimer et gérer des marchés permettant de réaliser les investigations dans de bonnes conditions,
- Assurer la qualité des investigations qui seront réalisées par les prestataires pour ne pas endommager les ouvrages,
- Mettre en place une démarche d'Assurance Qualité tout au long de l'opération, y compris en phase d'études.

Les investigations suivantes ont été retenues et définies dans les cahiers des charges :

- Gammagraphies
- Levés topographiques et relevés géométriques
- Réalisation des fenêtres
 - Implantation des fenêtres
 - Ouverture des fenêtres
- Ouvertures des gaines
- Prélèvements et analyse des coulis et des liquides
- Vidéo-endoscopies des gaines
- Contrôles des abouts de poutres
- Essai au tournevis
- Essai à l'arbalète
- Fermeture des fenêtres
- Mesure des épaisseurs d'enrobés par radar
- Contrôle de la chape d'étanchéité par thermographie infra-rouge
- Prélèvement de béton pour analyses diverses
- Caractérisation mécanique du béton
 - Résistance à la compression
 - Module d'élasticité
- Caractérisation de la formulation du béton
 - Masse volumique et porosité ouverte
 - Identification du liant
 - Détermination du dosage en ciment
 - Détermination du dosage en eau efficace
- Etude du vieillissement du béton
 - Mesure de l'enrobage
 - Mesure de l'activité de corrosion (degré et vitesse)
 - Mesure de la profondeur de carbonatation
 - Mesure de la profondeur des ions sulfates et chlorures

Réalisation des fenêtres



Tracé à la craie des éléments selon procédures et codifications couleurs



Trait de scie et forage à une profondeur fixe



Ouverture d'une fenêtre pathologique



Passivation des gaines et des armatures

Essais à l'arbalète



Tronçonnage aciers passifs



Mise en place écarteur et fourchette



Réalisation des essais sur armature

Ch. RAULET a expliqué comment les dossiers de consultations des organismes spécialisés ont pu être élaborés alors que le diagnostic des ouvrages et les quantités des investigations à réaliser n'étaient pas définies.

Il a également présenté la démarche basée sur une synthèse de l'expérience acquise sur plusieurs VIPP problématiques (complémentarité des

Les manifestations régionales

compétence laboratoire & B.E. structure dans l'ingénierie du diagnostic) :

- identification et définition préalable des variables (développé de poutres, nombre de câbles, nombre de câbles relevés, nombre de travées, nombre de tabliers, ...) rentrant en compte dans la définition potentielle de formules paramétrables par nature d'investigations,
- définition des protocoles laboratoires pour identification des circuits d'essais réalisables en laboratoire sur les éprouvettes, pour définition du nombre d'éprouvettes par zone d'essai en fonction des objectifs retenus,
- définition des temps d'investigations en fonction des contraintes d'exploitation et de l'accessibilité pour estimer les moyens d'accès et les plus-value de nuits,
- estimation des coûts unitaires moyens d'investigations par connaissances, pratiques, définition de programmes et contrôles des investigations pour le compte de Maîtres d'Ouvrage,
- itération sur des formules statistiques pour définir des quantités approximatives par nature d'investigations, en fonction des variables,
- rebouclage des formules paramétrées telles que définies sur la base des paramètres réels appliqués aux ouvrages pathologiques traités,
- validation des quantités d'investigations calculées automatiquement en regard des investigations réellement réalisées sur les VIPP pathologiques connus.

Ch.RAULET a notamment présenté les formules statistiques spécialement élaborées qui ont permis de quantifier à priori, à l'issue de cette démarche, les investigations sans avoir réalisé le diagnostic (qui restait de la responsabilité des prestataires en charge des investigations).

Il a présenté les méthodologies et jalonnement des contrôles souhaités par ASF sur la démarche retenue, ainsi que les fiches de contrôle spécialement développées.

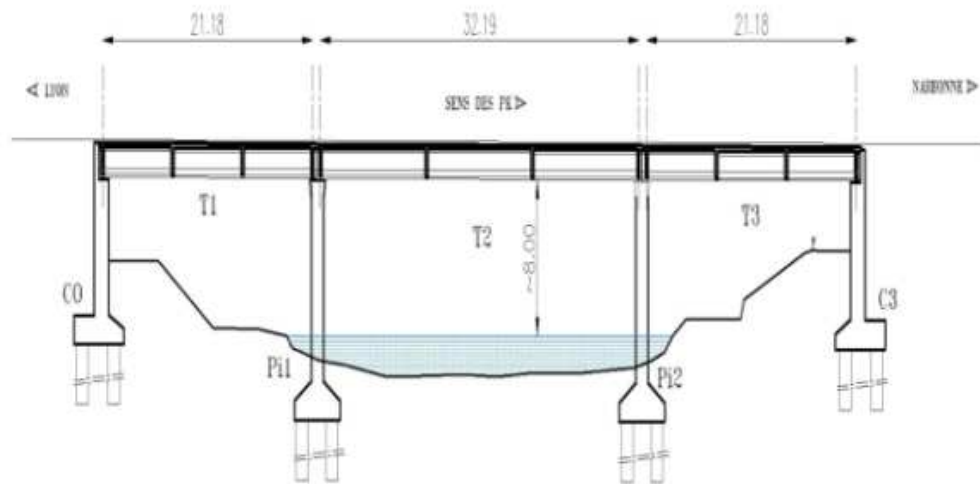
Ch.RAULET a terminé sa présentation par les 4 niveaux de rapports d'investigations par ouvrage qui ont été demandés aux prestataires retenus, permettant ainsi de définir les hypothèses précises des recalculs, à l'issue des marchés d'investigations réalisés sans dérive financière.

Les reconnaissances physico-chimiques de l'OA 1005 Michel Evariste et Christophe Carde

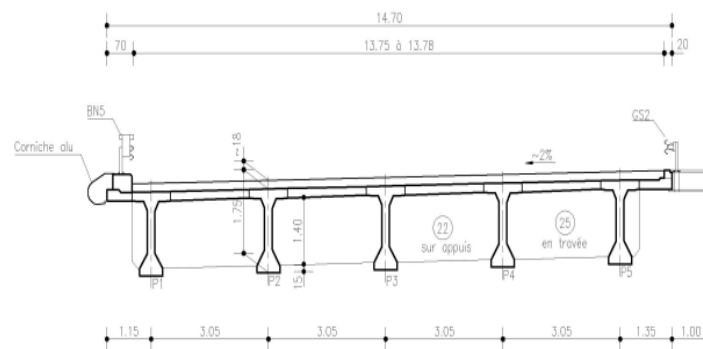
M.EVARISTE a présenté l'OA 1005 qui a été construit en 1966 par l'entreprise Pascal et Fils (Etudes d'exécution : Europe Etudes).

L'OA 1005 est constitué de :

- 3 travées (2 travées de rive de 21.18 m et une travée centrale de 32.19 m)
- Tracé en alignement droit - Profil en long en rampe 0.3 % - Biais 86 grades
- 6 tabliers (3 par sens) constitués de 5 poutres en travées de rive et 6 poutres en travée centrale
- Piles marteau et culées pleines avec murs en retour



Coupe longitudinale de l'OA 1005



Coupe transversale de l'OA 1005

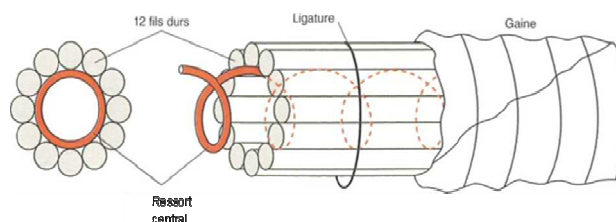
Précontrainte longitudinale

Poutres centrales

- 6 câbles 12 $\Phi 8$ (travée de rive) et 11 câbles 12 $\Phi 8$ (travée centrale) de type S.T.U.P.

Poutres des rives

- 6 câbles 12 $\Phi 8$ (travée de rive) et 12 câbles 12 $\Phi 8$ (travée centrale) de type S.T.U.P.



Principe des câbles 12 $\Phi 8$

Précontrainte transversale

Hourdis

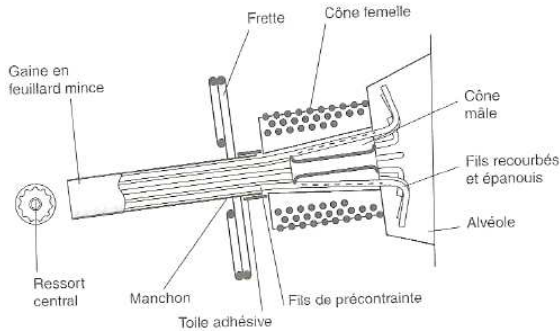
- 31 câbles 12Φ8 de type S.T.U.P. (travée de rive)
- 32 câbles 12Φ8 de type S.T.U.P. (travée centrale)

Entretoise d'about

- 2 câbles 12Φ8 de type S.T.U.P.

Entretoises intermédiaires

- 3 câbles 12Φ8 de type S.T.U.P.



Principe d'un ancrage STUP

La définition des investigations est basée sur :

- L'analyse des documents relatifs à la construction de l'ouvrage :
 - Analyse des plans (plans de projet, d'exécution, de récolement, d'adaptation)
 - Analyse des notes de calculs et des différents rapports et comptes rendus
- L'analyse des principales pathologies affectant l'ouvrage :
 - Consultation des rapports d'inspections détaillées et analyse des principales pathologies et de leur évolution
 - Analyse des précédentes investigations et notamment des campagnes de gammagraphies réalisées par le CETE
- La synthèse des éléments permettant d'orienter les investigations :
 - Analyse croisée entre les éléments relatifs à la construction de l'ouvrage et l'analyse des principales pathologies.

Analyse du dossier d'ouvrage :

- Recalcul de l'ouvrage effectué en 1971 suite à la mise en place de GBA et d'un rechargement d'enrobé de 6 cm

« Le calcul donne un moment maximal à mi-portée augmenté de 16 % sur les poutres de rives, cette augmentation reste acceptable compte tenu du ferrailage analogue à celui des poutres intermédiaires ».

- Résultats des essais sur béton et fiches de mise en tension de la précontrainte

Pas d'anomalie particulière relevée lors de la réalisation.

Principales pathologies affectant l'ouvrage :

- Calcites sèches sur le talon des poutres (P1T2 sur pile P1)
- Des fissures biaises d'ouvertures maximales de 0,3 mm sur l'âme des poutres suivant le tracé des câbles
- Ponctuellement, des aciers apparents corrodés sur les talons de certaines poutres
- Nids de cailloux avec aciers apparents corrodés en partie basse des entretoises
- Infiltrations d'eau sur les encorbellements au droit des joints de chaussée (tablier T1 sens 1 et culée C3 sens 1)

Les investigations réalisées ont concernées :

- La réalisation de relevés géométriques et topographiques des tabliers
- Les relevés d'épaisseurs d'enrobé au radar
- La réalisation de fenêtres d'accès aux câbles
- Contrôle visuel des cachetages aux abouts des poutres par vidéo-endoscopie (1 about sur 2 contrôlé)
- La caractérisation physico-chimique du béton sur zones pathologiques et zones saines (prélèvement de carottes),
- Contrôle de l'enrobage des aciers sur zones pathologiques et zones saines
- Contrôle de l'activité et de la vitesse de corrosion sur zones pathologiques et zones saines

Ch.CARDE a présenté les investigations réalisées.

Mesure de l'épaisseur d'enrobés et contrôle de la chape d'étanchéité :

Mesure de l'épaisseur d'enrobés réalisée par radar géophysique de conception et fabrication LERM.



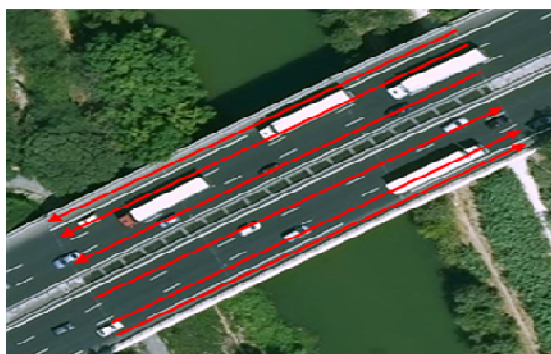
Radar Géophysique LERM



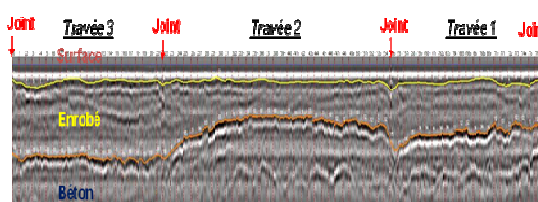
Mesures sur site



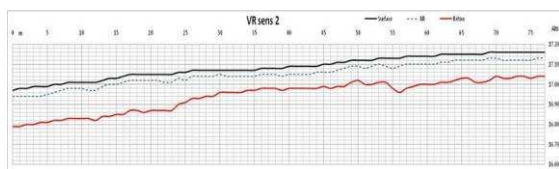
Réalisation de deux sondages destructifs (1 par tablier) pour étalonnage des mesures Radar



Réalisation de 3 profils radar par tablier (BAU, VL et VR)



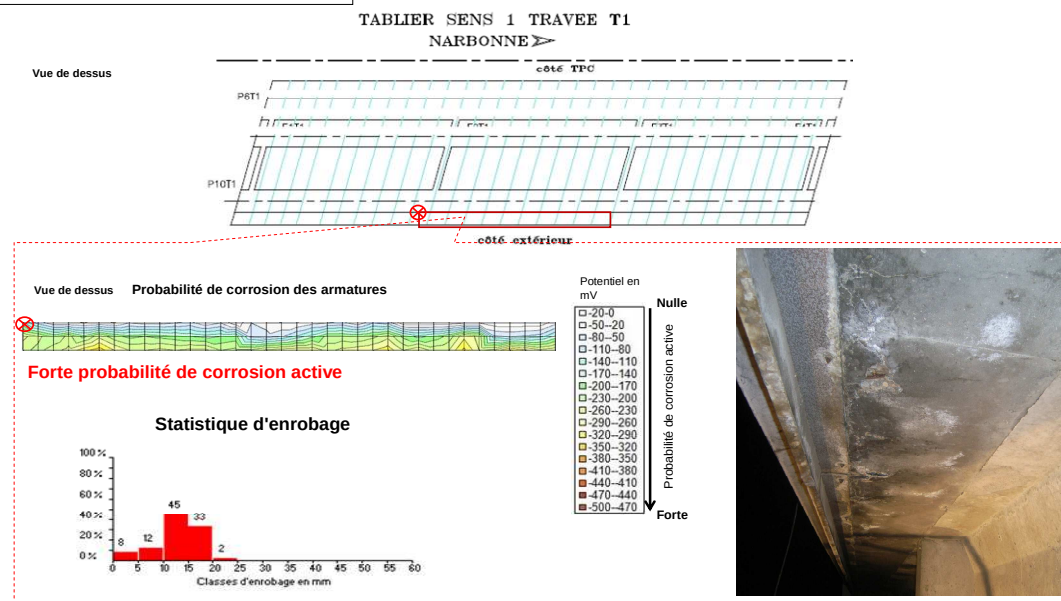
Profil radar en Voie Rapide en sens 2



Coupe altimétrique en Voie Rapide en sens 2

A9 - OA 1005
Hourdis T1 (encorbellement)
milieu P10 - côté ext.

Etude du ferrailage passif
Mesures d'enrobage et d'activité de corrosion



Etudes corrosimétriques

M.Evariste a conclu en présentant les résultats des investigations et les incidences sur la suite de l'opération.

Les mesures mises en œuvre par ASF suite aux découvertes de l'état des câbles - Hervé Guérard

Au travers des investigations menées sur cet ouvrage, des risques de rupture à plus ou moins brève échéance liés à une insuffisance de la précontrainte ont été notés. Aussi, les tensions mesurées étaient inférieures aux tensions calculées et les épaisseurs d'enrobés étaient supérieures à celle théorique.



Gaine non injectée + fil détendu



Nombreux câbles corrodés

Les manifestations régionales

Hervé GUERARD a ainsi présenté les mesures d'urgence prises par ASF dans les plus brefs délais, afin de garantir la durée de vie de l'ouvrage et la sécurité du réseau, en attendant un éventuel remplacement :

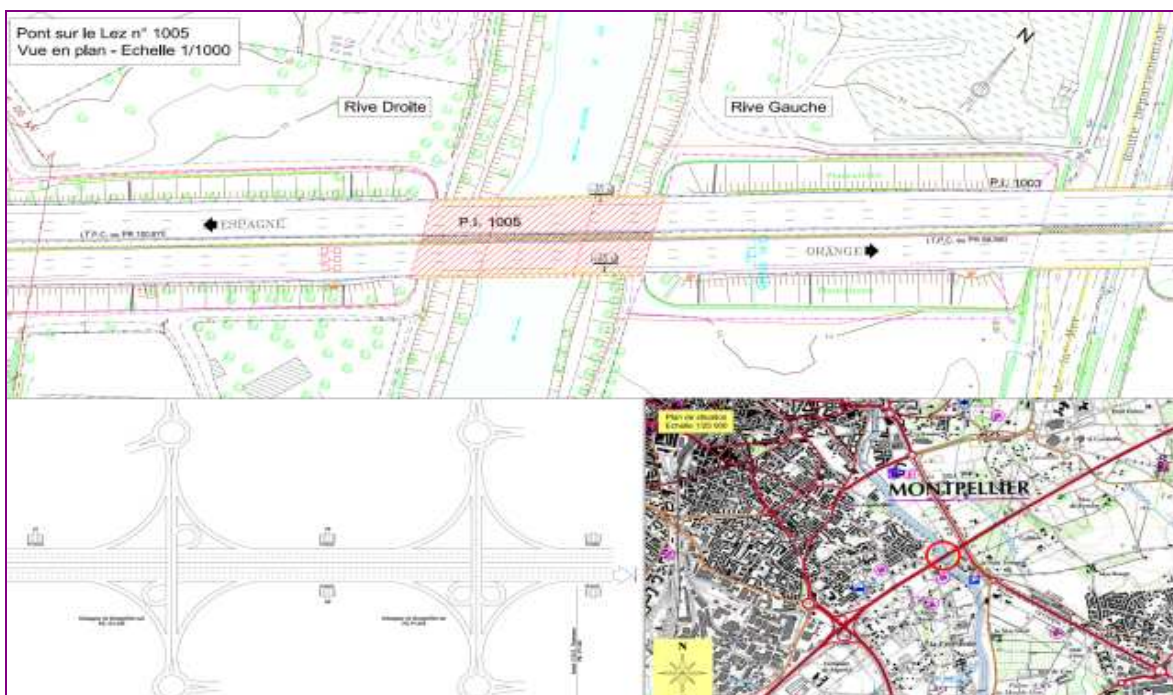
- Neutralisation des BAU par dispositif léger,
- Renforcement provisoire ou définitif de cet ouvrage,
- Décision d'alléger l'ouvrage du poids d'enrobés excédentaire,
- Déclenchement d'une étude d'AVP avec Freyssinet et ARCADIS.

Il a conclu sa présentation en exposant les principes de réparation retenus et le calendrier de l'opération qui a conduit en 4 mois à la signature d'un marché de conception-construction avec le groupement FREYSSINET-ARCADIS.

10 - La problématique d'exploitation, les mesures d'urgence et les travaux réalisés - V.Meyer

Vincent MEYER a présenté la problématique d'exploitation pour les interventions sur l'ouvrage :

- Déchargement de l'OA
- Dépose & repose des joints de chaussée
- Problématique d'exploitation - renforcement de l'OA :
 - platelage sous l'ouvrage pendant toute la durée des travaux de renforcement
 - pas d'incidence sur l'exploitation (pas de restriction du trafic nécessaire) pendant toute la durée des travaux, notamment pendant le coulage des blochets d'ancrage sans restriction particulière.



Situation de l'ouvrage

Il n'y a pas eu de restriction non plus pour la mise en œuvre de la précontrainte.

Les incidences des mesures d'urgence ont été présentées:

- Largeur roulable : neutralisation de la BAU (empêcher le chargement sur 4 voies). Présence de l'échangeur Montpellier-Sud en aval.
- Déchargement de l'OA :
 - soulagement sensible de l'OA : -150 tonnes sur tablier sens 1, -80 tonnes sur tablier sens 2
 - compte tenu de la contrainte trafic, déchargement en 2 opérations de nuit (nuits du samedi à dimanche), avec coupure d'une chaussée de l'autoroute.
- Diverses actions à conduire entre février et mai 2009 :
 - sondages (validation épaisseurs de chaussée issues du relevé radar effectué dans le cadre du DIAG)
 - carottages hors OA (structure de chaussée)
 - signalisation pour déviation sur le réseau secondaire
 - rehausse glissières
 - rétablissement boucles de comptage
 - contrainte réseau FO.

Au final, il s'agit d'une étape moins technique que le renforcement, mais qui aura mobilisé un plus grand nombre d'intervenants :

- travaux dans la nuit du Samedi au Dimanche pour :
 - augmenter l'amplitude du poste de travail (*rabotage et application nouvel enrobé imposés dans la même nuit*)
 - minimiser l'impact en cas de réouverture tardive et/ou partielle le matin (*approche gestion des risques*)



Travaux de nuit

Les manifestations régionales



Travaux de nuit

L'organisation Qualité a été basée sur :

- Une relation de confiance,
- Une définition concertée des points critiques / points d'arrêt (Entreprise / Contrôle Externe / ASF),
- Des procédures systématiques (VISA contrôle externe + avis ASF),
- Des fiches de suivi systématiques et « systémiques » pour les différentes opérations.

Le suivi acoustique – Alexandre Chaperon

La société ADVITAM a été missionné par ASF pour réaliser le suivi acoustique sur l'ouvrage, afin de localiser des éventuelles ruptures des câbles de précontrainte au niveau des poutres.

Alexandre CHAPERON a présenté le système SOUNDPRINT.

La localisation d'une rupture est définie par le système de supervision auquel chaque capteur est physiquement connecté par voie filaire à des boîtes de jonction et à la centrale d'acquisition.



Câblages



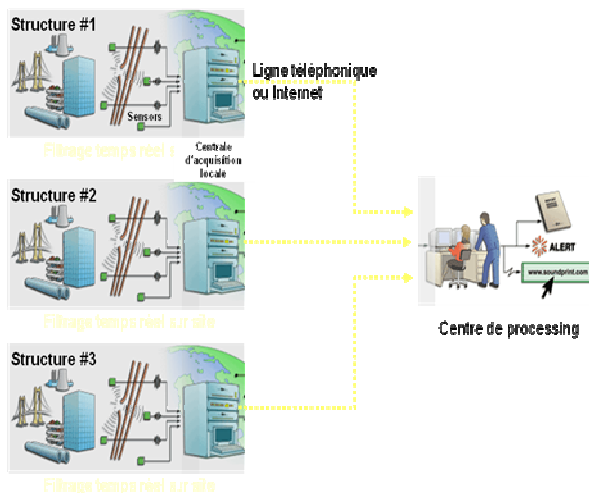
Boitiers de jonction



Centrale d'acquisition

Dans cet ouvrage, 156 capteurs acoustiques ont été installés sur les poutres et il y a 4 zones acoustiques distinctes par tablier afin de réduire le nombre de mesures.

Après l'installation du système, des tests d'impacts au scléromètre sont effectués, pour le réglage initial des seuils d'amplification et déclenchement.



Processus de suivi

ASF a ensuite accès de manière permanente au suivi de l'ouvrage par internet.

La surveillance opérationnelle permet ensuite, lors de la détection d'un bruit suspect sur l'ouvrage, de notifier une alerte automatique à ASF.

L'analyse des signaux permet ensuite de confirmer dans les 24 heures les ruptures de fils et de définir ensuite les mesures ad-hoc.

Les études d'exécution du renforcement - Michel Boy

Michel BOY a présenté rapidement l'ouvrage puis a détaillé les hypothèses prises pour le recalcul basées sur les résultats des investigations présentées préalablement.

D'après les 31 mesures effectuées sur les fils Ø8, on constate des résultats qui sont différents au niveau des talons et âmes des poutres et au niveau des hourdis. Des réductions de tensions sont notées également par rapport à la note de calculs de l'époque sur les différentes parties de l'ouvrage.

RESULTATS DES INVESTIGATIONS :

- Tension mesurée dans les câbles (31 mesures effectuées sur des fils Ø8)

	F moyen mesuré (sur 1 fil Ø 8 mm)	Réduction / note de calcul d'époque
Dans le talon des poutres	F = 36.5 kN (3.7 tonnes) par fil	- 14 %
Dans les âmes des poutres	F = 36.25 kN (3.7 tonnes) par fil	- 11 %
Dans le hourdis	F = 40.45 kN (4.1 tonnes) par fil	- 10 %

1 fil rompu + 2 fils détendus ont été intégrés.

La tension initiale au vérin était de ~ 74 tonnes/ câble : soit ~ 6.2 t / fil d'où une tension résiduelle actuelle T : 60 % Tinit < T < 66 % Tinit

RESULTATS DES INVESTIGATIONS

- Résistance des bétons

-> Hypothèse de la note de calcul d'époque : 450 kg/cm² à 90 jours

	Poutre P10	Poutre P1	Poutre P6	Poutre P1
Résistance moyenne mesurée	41.6 MPa	48.5 MPa	42.5 MPa	29.2 MPa (à l'about)

(Sur éprouvette cubique : ce qui correspond à ~ 35 MPa à 28 jours sur éprouvette cylindrique)

■ Revêtement de chaussée

Épaisseur de 12 à 15 cm (dû à un rechargement de chaussée de 6 cm en 1983)

RESULTATS DU RECALCUL : (ETAT ACTUEL)

■ Poutres principales : En flexion à mi-travée

Combinaisons (E.L.S.)	Quasi. Perm.	Fréquente	Rares
Contraintes normales (*)	+5.0 à +7.0 MPa	-2.0 à -3.0 MPa	-6.0 à -8.0 MPa

(*) Les contraintes minimales sont obtenues dans les poutres de rive

Rappel : il s'agit des vérifications « réglementaires » avec 4 voies chargeables

En cisaillement à l'about

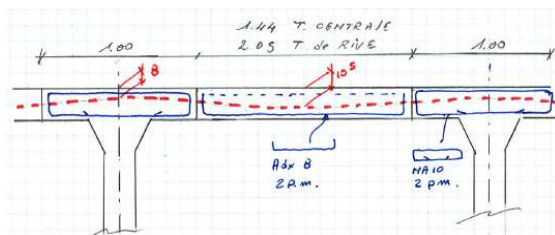
(T. Centrale) : Cisaillement maxi = 2.8 MPa (admis ~ 2.5 MPa)

(T. de rive) : Cisaillement maxi = 2.9 MPa (admis ~ 2.3 MPa)

■ Hourdis :

En flexion transversale (calcul en classe 3 avec prise en compte des aciers passifs)

	Sections entre poutres	Sections au droit des poutres
Armatures nécessaires	~ 3.20 cm ² / ml	~ 1.50 cm ² / ml
Armatures existantes	1.00 cm ² / ml (2Ø8 Adx / ml)	1.57 cm ² / ml (2HA10 / ml)



Principes des câbles transversaux

DECISION CONCERNANT LES MESURES IMMEDIATES

- Limitation à 3 voies (condamnation de la BAU)
- Rabotage de la chaussée pour réduire les charges permanentes

DECISION CONCERNANT UN PROJET DE RENFORCEMENT

Le projet de renforcement a pour objet la mise en sécurité de l'ouvrage pour une durée de vie à moyen terme qui dépendra en particulier des informations de la mise sous surveillance.

Les manifestations régionales

PRINCIPES DU RENFORCEMENT RETENU

- Renforcement par précontrainte additionnelle vis-à-vis de la flexion (seule technique permettant de compenser l'importance des défauts de capacité portante).

À titre indicatif, dans l'hypothèse la plus défavorable, la perte de précontrainte est estimée à ~ 33% x 11 câbles de 50 tonnes : soit 180 tonnes par poutre.

- Ancrages au plus près des appuis pour améliorer la résistance aux efforts tranchants des zones d'about.
- Utilisation préférentielle de petites unités et répartition des ancrages (pour tenir compte de la faible épaisseur des âmes).
- Renforcement complémentaire des zones d'about par des tissus en « matériaux composites »

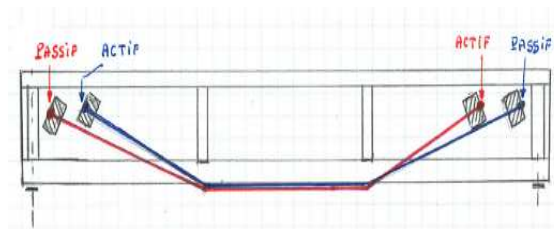


Schéma de principe de la précontrainte additionnelle



Déviateurs des câbles de précontrainte longitudinale

RENFORCEMENT DES POUTRES

- Unités = 2 T 15 soit au total 8 T 15 à mi travée.
- Déviateurs positionnés sous le talon des poutres, au droit des entretoises intermédiaires.
- Ancrages passifs positionnés au plus près de l'entretoise (35cm) pour assurer le renforcement vis-à-vis des cisaillements de la zone d'about.
- Blochets d'ancrage cloués sur les âmes par barres de précontrainte Ø 36

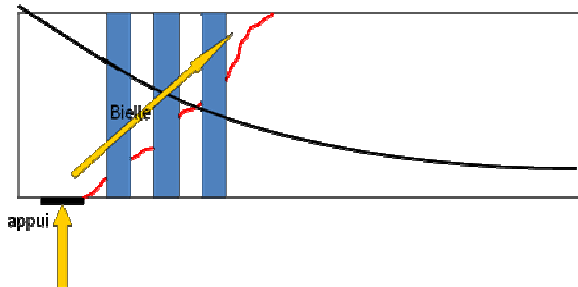
RENFORCEMENT DES ABOUTS DE POUTRES

- Renforcement de la zone d'about au moyen de TFC® (Tissu en Fibre de Carbone)

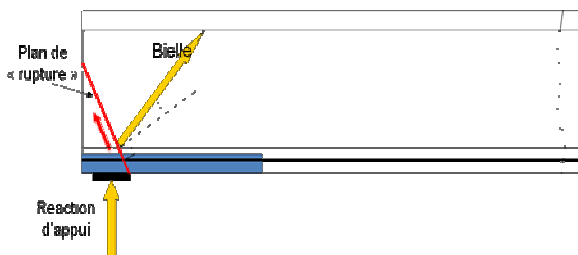
Dimensionnement avec l'hypothèse accidentelle de la rupture d'un câble :

- > câble le plus incliné sur appui vis-à-vis de l'équilibre de la bielle
- > câble le plus bas vis-à-vis de l'équilibre du coin

Renforcement de l'âme et de la bielle d'about = bandes verticales.



Principe de renforcement des bielles



Principe de renforcement des appuis

Equilibre du coin sur appui : dimensionné par la rupture du câble le plus bas.

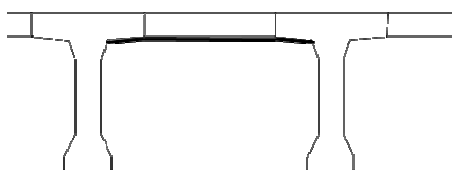
- > bandes horizontales ancrées par rapport à l'appui



About de poutre renforcé

RENFORCEMENT DES HOURDIS

- Le déficit concerne les zones entre poutre vis-à-vis des moments de flexion positifs
- et la liaison entre table des poutres et hourdis coulés en place (aucune armature).



Principe de renforcement des hourdis

Les manifestations régionales

-> Renforcement « classique » par bandes de composites (TFC) : les bandes sont dimensionnées par la flexion à mi-hourdis et prolongées jusqu'aux âmes des poutres.

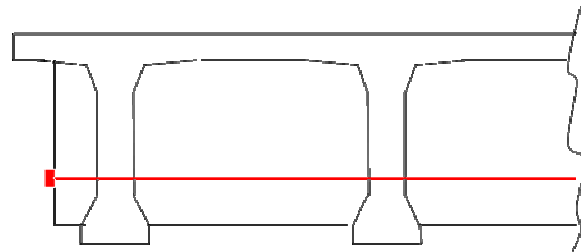
RENFORCEMENT DES ENTRETOISES INTERMEDIAIRES

Les armatures passives sont quasiment inexistantes (2 Ø 12 en fibre inf.) eu égard aux règles de ferrailage minimum de l'époque.

Le calcul a mis en évidence :

- > Travée de rive : O.K. (entièrement comprimée)
- > Travée centrale : légère décompression sous sollicitations maximales en fibre inférieure.

Pour le renforcement additionnel des entretoises, un toron T15 de part et d'autre de chaque entretoise a été mis en oeuvre.



Principe de renforcement des entretoises intermédiaires

Les travaux de renforcement par précontrainte additionnelle et tissus composites - Christian Schmitt et Patrick Consalvi

Le chantier de renforcement de l'OA 1005 est un marché de conception-réalisation obtenue par le groupement FREYSSINET (Mandataire) et ARCADIS.

Patrick CONSALVI a présenté les travaux et le planning de l'opération qui fut le suivant :

- Etablissement avant projet: mars - avril 2009
- Ordre de service le 18/05/2009
- Installation de chantier le 25/05/2009
- Décaissement, allègement tablier fin mai 2009
- Début des renforcements le 16/06/2009

Des moyens importants ont été mis en œuvre car il s'agissait d'un impératif pour respecter le délai :

- des moyens d'accès permettant de travailler sur l'ensemble de la structure
- un platelage général de 2500 m2 dont l'essentiel est suspendu



Vue d'ensemble de l'échaffaudage



Vue d'ensemble de l'échaffaudage



Vue d'ensemble de l'échaffaudage

Renforcements par Tissu de Fibre de Carbone (FOREVA TFC)

Les différentes étapes des travaux sont:

- préparation de surface: ponçage
- réception du support (essai SATTEC)
- application d'une couche de résine
- marouflage du Tissu
- application de la couche de résine de fermeture



TFC sous abouts de poutres et sur hourdis



Essais SATTEC

Précontrainte additionnelle longitudinale

Les caractéristiques des travaux sont :

- repérage radar des câbles de précontrainte
- carottages des poutres
- blochets béton coulés en place
- précontrainte par barres type Freyssibar
- câbles 2T15 gainés graissés injectés avant mise en tension



Réalisation des blochets



Réalisation des blochets



Pose des déviateurs



Pose des déviateurs



Gainage



Mise en tension



Visite de chantier

Prestations complémentaires

Réinjection (localisées) de gaines vides.



Réinjection des gaines vides

Conclusion

Le recours à la procédure Conception Réalisation a rendu possible le traitement de l'ensemble du processus en moins de 10 mois, avec optimisation des coûts et des techniques :

- o Identification de la problématique de l'ouvrage: février 2009
- o Fin des travaux le 30/11/2009

CONCLUSION

Cette manifestation a permis à la centaine de participants d'acquérir des connaissances techniques sur la démarche et les méthodes spécifiques d'investigations et de diagnostic propres aux ouvrages sensibles de type VIPP.

Les choix d'organisation des acteurs par ASF et les méthodes de conduite d'un projet de renforcement en urgence, suite à la découverte d'un problème diagnostiqué précisément dans le cadre d'une démarche ad-hoc, ont été exposés. Les investigations, études et travaux de réparation et de renforcement d'un ouvrage d'art de type VIPP, conforté 4 mois après la découverte des problèmes sur l'état des câbles, ont ainsi été exposés.

Cette conférence s'est avérée être un lieu d'échanges à la fois lors des questions-réponses après chaque intervention mais également lors du déjeuner et de l'agréable café pris en terrasse, et lors des visites sur chantier.

Afin de rendre encore plus bénéfique cette conférence pour les participants, l'après-midi a été consacrée à la visite de l'ouvrage dont les travaux étaient presque achevés, les travaux de précontrainte additionnelles étant tous effectués.

A l'issue de cette manifestation, l'AFGC Méditerranée et les ASF ont assuré la diffusion des supports par un CD ROM envoyés aux participants.

Nous remercions tous les acteurs ayant contribué au bon déroulement de cette conférence-visite, qui ont communiqué leur intérêt pour ces travaux et nous ont communiqué leur passion pour le génie civil.

Compte-rendu réalisé par Moustapha TINE et Mirvesh JUGURNAUTH, étudiants en licence 3ème année - MASTER IMRO d'EGLÉTONS - Stagiaires chez DIADES et révisé par N.VERGER et Ch.RAULET - DIADES