

21 novembre 2006 à Marsannay la côte La réparation du viaduc Kennedy à Dijon

Le 21 novembre 2006, l'AFGC Rhône-Alpes a organisé une conférence-visite autour du chantier de réparation du viaduc Kennedy à Dijon.

Rappel du programme

- 9h30 Accueil des participants
- 9h45 Le mot du Président
Jacques Martin (AFGC Rhône-Alpes)
- 10h00 Présentation générale de l'ouvrage - Contexte de l'opération
Gérard Julien, Franck Genelot (Ville de Dijon)
- 10h15 Les investigations préalables à la réparation
Jean-Claude Wendling, Jacques Resplendino (CETE de Lyon)
- 10h30 Le projet de réparation
Sébastien Bouteille (CETE de Lyon)
- 11h00 Les études d'exécution
Jean Vassord, Patrice Ello (Arcadis)
- 11h30 Pause
- 11h45 Le suivi des travaux
Franck Genelot (Ville de Dijon)
M Henry (CEBTP)
- 12h00 Les travaux de réparation
Yves Loué, Samy Ammar (Freyssinet)
- 12h45 Discussion
- 13h00 Repas sur place au HUGOTEL
- 14h45 Visite du chantier de réparation du Viaduc Kennedy avec les intervenants (MOA, MOE, Labo, Entrepreneurs)

1. Présentation, contexte général

L'AFGC Rhône Alpes

L'AFGC est une association transversale à la profession qui regroupe tous les acteurs oeuvrant dans le domaine du génie civil. Elle a pour objectif de créer un lien et de favoriser les échanges entre architectes, ingénieurs, entrepreneurs, maîtres d'ouvrages, chercheurs, étudiants..., afin de faire connaître et de faire évoluer le secteur du génie civil. Pour cela, l'agence Rhône Alpes organise régulièrement des conférences et des visites autour d'un ouvrage présentant des particularités, tel que le viaduc Kennedy à Dijon.

Durant le premier semestre 2007, seront organisées des visites de l'A41 avec ADELAC et du Grand pont sur la Loire. Durant le second semestre, la visite à ne pas manquer est celle de la ligne des Carpates (voie ferrée reliant Bourg-en-Bresse à Bellegarde-sur-Valserine via Nantua) avec RFF/SNCF, qui présente un très grand nombre d'ouvrages de génie civil sur une courte distance.

Déroulement de la journée

La journée s'est déroulée en suivant le programme établi par M. Jacques Martin (Président de la délégation) qui n'a pas pu être présent ; il a été remplacé par Jacques. Resplendino (trésorier) pour l'accueil des 31 participants et la présentation de l'association.

Les interventions des différents acteurs de la réparation de l'ouvrage ont été ponctuées de nombreuses questions, qui ont traduit l'intérêt des participants pour la conférence.

Après le repas au HUGOTEL, la journée s'est achevée par la visite du viaduc Kennedy, en compagnie de l'entreprise Freyssinet qui a mené la visite guidée.

Présentation du viaduc Kennedy

Le viaduc Kennedy permet au boulevard Maillard de franchir plusieurs voies de communication : une rue, un réseau de voies ferrées, le canal de Bourgogne et un chemin de halage.

C'est un ouvrage double, courbe, réalisé entre 1970 et 1972, dont le tablier est de type caisson à âmes inclinées, en béton précontraint (cf. figure 1). Les deux tabliers comportent cinq travées et reposent sur deux piles « dédoublées » en forme de V en partie centrale (P3 et P4), et sur deux piles avec articulation Freyssinet en tête, sur les extrémités (P2 et P5). Les parties de tablier proches des culées ont été réalisées sur cintre, le reste à été réalisé par encoirbellement successifs (cf. figure 4).

La culée nord (C1, cf. figure 2) présente la particularité d'avoir à la fois des appuis positifs et des appuis négatifs, pour compenser la réaction d'appuis vers le haut sous certains cas de charges, due à la faible longueur de la dernière travée (11m pour l'ouvrage intérieur).

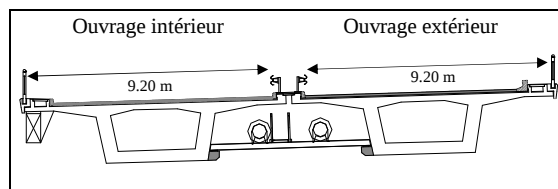


Figure 1 - Vue en coupe de l'ouvrage

Contexte de l'intervention sur l'ouvrage

Dès 1993, dans le cadre d'une campagne de recensement des ouvrages d'art menée par la ville de Dijon, le viaduc Kennedy retient l'attention car chacun des deux caissons comporte plusieurs sections fissurées, qui correspondent à des joints de voussoirs. En 1997, il est soumis à une inspection visuelle détaillée servant à relever l'ensemble des désordres.

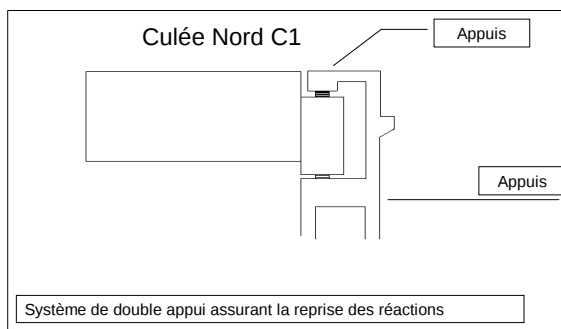


Figure 2 - Détail de la culée Nord

Il ressort que ce viaduc doit faire l'objet d'une attention particulière. De là commence une campagne d'investigations pour déterminer quel est l'état de dégradation réelle de l'ouvrage (et non uniquement celui visible à l'œil), pour ensuite faire les réparations nécessaires.

L'état du viaduc était préoccupant car malgré la précontrainte longitudinale, l'ouvrage extérieur présentait deux fissures traversantes d'une ouverture de 0.8mm et de 2mm sur les âmes et le hourdis inférieur. L'ouvrage intérieur présentait trois fissures comparables. Cette fissuration met en évidence un manque de précontrainte. De plus, le souffle des fissures variant en fonction des sollicitations (circulation, thermique...), un phénomène de fatigue du câble de précontrainte peut apparaître à cet endroit. Il était donc indispensable de mener des investigations supplémentaires et d'effectuer un recalcul de l'ouvrage. La figure 3 récapitule les fissures pathologiques.

	Position fissure	Ouverture
Ouvrage intérieur	Entre P4 et P3 (x = 68.4 m)	0.6 mm
	Entre P3 et P2 (x = 113.7 m)	0.4 mm
	Entre P2 et P3 (x = 130.0 m)	1.5 mm
Ouvrage extérieur	Entre P4 et P5 à 4.5m de P5 (x = 24.5 m)	0.8 mm
	Entre P2 et P3 à 7.6 m de P2 (x = 127 m)	2.0 mm

Figure 3 - Récapitulatif des sections pathologiques

2. Les investigations

Recherche des causes de la dégradation

La première démarche a été de rassembler tous les documents produits lors de la construction de l'ouvrage pour essayer de mettre en évidence un défaut lors de conception ou de la réalisation. Malheureusement, le dossier de l'époque ne comporte aucun plan de recollement permettant de connaître quel a été le mode de réalisation de l'ouvrage. Par contre il contient tous les plans de coffrage, avec la position des câbles de précontrainte. Par la suite il apparaîtra que cette

position n'a pas toujours été bien respectée lors de la réalisation.

Les premières investigations ont concerné les variations de longueur du tablier, en suivant le souffle des joints de chaussée en fonction de l'amplitude thermique. La question était de savoir si les appuis mobiles ne bloquaient pas ces mouvements, qui auraient pu engendrer des contraintes et provoquer les fissures constatées. Il est apparu que l'ouvrage se dilatait normalement.

Avant 1973, certains effets n'étaient pas pris en compte dans les calculs :

- la différence de température entre le hourdis supérieur et inférieur, qui correspond à de la traction sous gradient thermique ;
- la redistribution des efforts dus au fluage du béton précontraint

Le recalcul de l'ouvrage (par la DOA du CETE de Lyon) avec les chargements actuels met en évidence le fait que le gradient thermique entre la face supérieure et la face inférieure du tablier peut expliquer en partie la fissuration (voir partie 3). Le pont a ensuite été instrumenté, d'une part pour vérifier la concordance des hypothèses avec la réalité, et d'autre part afin d'affiner les modèles de calcul en « collant » au mieux au fonctionnement de l'ouvrage.

L'instrumentation

L'instrumentation du viaduc a été faite sur l'ouvrage extérieur, qui présentait les plus grosses dégradations. Elle a été réalisée de plusieurs manières :

- Pose de thermocouples pour connaître les variations de température à l'intérieur et à l'extérieur de l'ouvrage.
- Pose de capteurs de déformation pour suivre l'évolution de l'ouverture des fissures lors du passage de charges et sous gradient thermique.
- Pose de jauges de déformations sur les câbles permettant déduire la contrainte à laquelle ils sont soumis.

Cette opération a nécessité la réalisation de fenêtres d'auscultation dans le béton, en des points particuliers, au niveau des câbles de précontrainte à tester.

Ces fenêtres ont permis aussi de vérifier l'état des câbles et du coulis. Certains câbles, mal injectés, étaient légèrement rouillés, mais celle-ci disparaissait après brossage. Le PH du coulis permet encore une bonne passivation des aciers, et il n'y avait pas de traces de circulation d'eau dans les gaines.

- Campagne de gammagraphie par le LRPC de Nancy, permettant de vérifier l'injection de câbles. Il est apparu que 40% des câbles testés ont été mal injectés.
- Analyse d'un morceau de toron, afin de vérifier le comportement du câble sous tension. Il apparaît qu'il n'a

pas de sensibilité particulière vis-à-vis de la corrosion fissurante sous tension.

L'ensemble des données mesurées ont été récupérées en temps réel par une centrale d'acquisition positionnée dans le tablier pendant 7 jours. Des convois de camions

ont circulés pour effectuer des mesures précises de l'ouverture des fissures sous ce type de sollicitation. Cela a aussi permis de déterminer la tension dans les câbles de précontrainte.

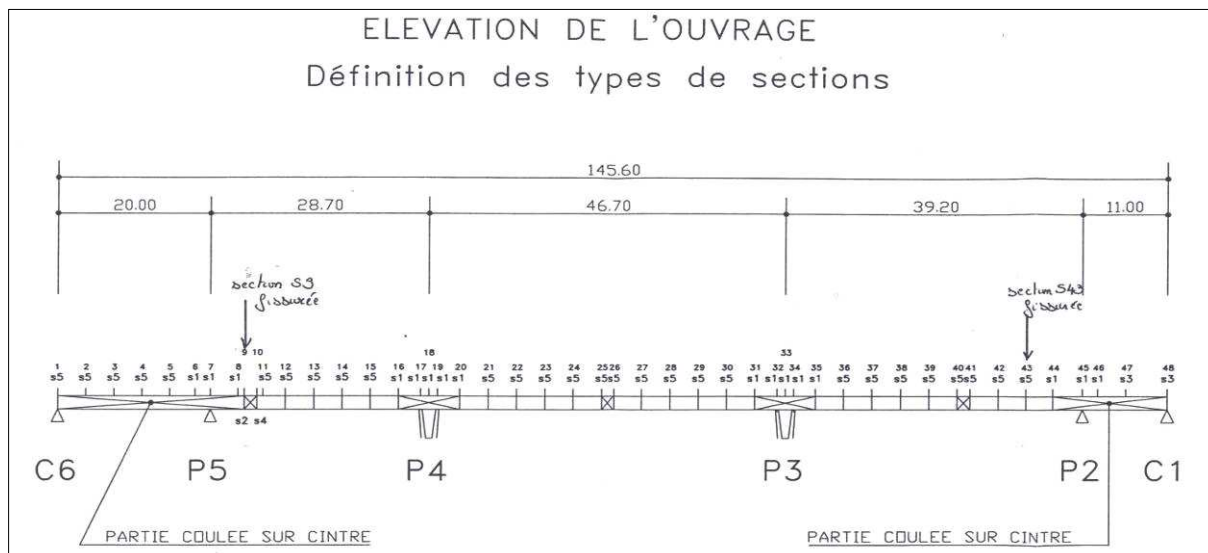


Figure 4 - Elévation de l'ouvrage

Ces investigations approfondies permettent de faire plusieurs constats :

- Les variations de température appliquées à l'ouvrage permettent d'expliquer en partie la fissuration. Des simulations plus approfondies sont néanmoins nécessaires pour expliquer parfaitement le phénomène.
- Les câbles de précontrainte présentent beaucoup de défauts d'injection. Cependant, le tablier est assez étanche et les câbles ne sont pas altérés par la rouille. Il apparaît tout de même un manque d'environ 30% de précontrainte dans l'ouvrage.

Remarque sur l'utilisation de l'ouvrage :

Pendant les premières années de sa vie, l'ouvrage était équipé d'un système de lampes chauffantes permettant d'éviter que la chaussée ne gèle en hiver. Ces lampes ont créé un fort gradient thermique entre l'intrados et l'extrados du tablier (supérieur aux 12° réglementaires) qui a pu provoquer la fissuration prématurément.

3. Les études techniques et modélisations

Détermination du phasage de construction.

En l'absence de plan de recollement, il a été nécessaire de déterminer le phasage de construction pour expliquer en partie la position des fissures, ainsi que pour permettre de réaliser les études d'exécution.

Certaines fissures sont situées dans la zone d'interface entre la partie coulée sur cintre et la partie réalisée en

encorbellement, d'autres sont dans des zones de changement de section. Mais ces singularités n'expliquent pas à elles seules la fissuration, notamment parce que d'autres zones singulières sur l'ouvrage ne sont pas fissurées.

Plusieurs phasages ont donc été testés par le CETE, et il a été retenu celui qui conduit à la fissuration actuelle.

Explication de la fissuration

Le CETE de Lyon a réalisé une modélisation de l'ouvrage afin de déterminer quelles sont les sections les plus sollicitées, sous les chargements réglementaires pris en compte actuellement.

Il est apparu que les zones fissurées correspondent à des foyers de moment (changement de signe), donc peu sollicitées en flexion. En l'absence de prise en compte du gradient thermique, comme c'était le cas lors de l'étude de l'ouvrage, ces zones ne nécessitaient pas beaucoup de ferrailage. Par contre, si l'on prend en compte ce chargement, des contraintes de traction apparaissent (-2.4 MPa, pic n°1 sur figure 5), qui ne sont reprises par aucune armature. Certaines sections dans l'ouvrage sont soumises à des contraintes de traction plus importantes et ne sont pas fissurées (-3.2 MPa au milieu de la grande travée, pic n°2 sur figure 5), car elles sont beaucoup plus ferrillées, étant aussi soumises à des moments importants.

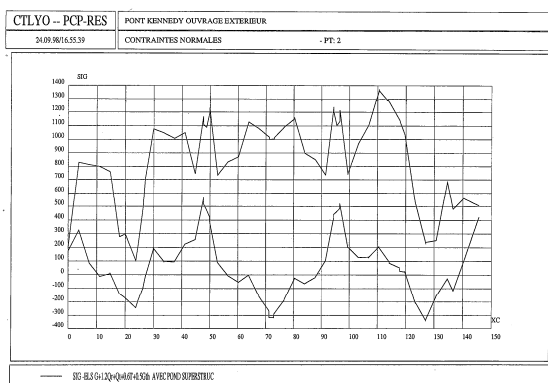


Figure 5 - Contraintes normales dans l'ouvrage avec sollicitations thermiques

Cette modélisation conduit à des contraintes très élevées dans les sections fissurées (rupture des armatures passives, contraintes de 1000 MPa dans les câbles de précontrainte...) sous l'action du moment engendré par un gradient thermique réglementaire de 12°. Il apparaît évident qu'une redistribution des efforts intervient lors de la fissuration, par formation d'une rotule plastique.

Pour connaître l'état de contrainte réel dans l'ouvrage il a donc été nécessaire de réaliser un calcul en section fissurée (classe III, non linéaire), car le gradient thermique entraîne une plastification des armatures.

Etude du projet de réparation

Le CETE de Lyon a étudié un projet de réparation pour répondre aux points suivants :

Sur l'ouvrage extérieur :

- Détermination du principe de renforcement par précontrainte additionnelle (position des ancrages, effort à appliquer, déviateurs)
- Recensement des effets de la précontrainte additionnelle sur l'ouvrage et des points à surveiller particulièrement lors de l'étude d'exécution.

Sur l'ouvrage intérieur :

- Dimensionnement d'un câblage centré simulant le renforcement par précontrainte.

Le dimensionnement de l'effort de précontrainte global à appliquer à l'ouvrage pour reprendre les tractions dans la structure se fait en deux temps :

- En premier lieu, la précontrainte est assimilée à un gros câble centré dans l'ouvrage.
- Dans un second temps, un calcul approfondi est réalisé en positionnant les câbles. Dans ce cas, il a montré que l'effort déterminé précédemment est l'effort minimal pour la réparation, mais qu'il ne peut pas être augmenté sans entraîner un dépassement de la contrainte réglementaire de compression admissible dans le béton.

Par la suite, il a été nécessaire de déterminer quelles sont les contraintes maximales que les âmes peuvent supporter, pour le dimensionnement des câbles de précontrainte ainsi que des massifs d'ancrage. Ici, il est apparu que les unités maximales ancrables sont des 19T15S. Pour des raisons géométriques ainsi que pour limiter la diffusion des efforts de précontrainte aux ancrages, 3 unités de 12T15S par âmes ont été positionnées.

Des difficultés particulières sont apparues lors du dimensionnement des ancrages de la travée Nord, du fait de sa faible longueur (11 m) et de la présence de câbles de précontrainte existants dans les âmes. Dix unités de clouage ont été positionnées dans cette zone pour assurer la liaison entre les massifs et les âmes. Ces clous ont été positionnés de façon à reprendre les efforts de glissement des massifs d'ancrage, tout en évitant de couper les câbles existants.

Le travail suivant a été de déterminer le tracé en plan et en élévation des câbles de précontrainte pour satisfaire aux conditions de réparation (renforcer les zones pathologiques), sans entraîner de contraintes trop importantes en certaines zones déjà comprimées.

- L'étude géométrique (courbure - déviateurs existants) a permis de déterminer le nombre et l'emplacement déviateurs assurant les déviations en plan
- L'étude d'un câble moyen centré (en plan) a permis de déterminer le nombre et l'emplacement des déviateurs assurant les déviations verticales du tracé

Le passage des câbles de précontrainte additionnelle au niveau des piles a nécessité une attention particulière pour éviter les câbles des clouages du voussoir sur la pile (cf. figure 6).

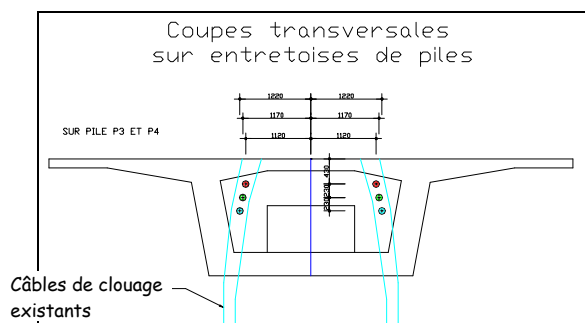


Figure 6 - Voussoir sur pile

Le phasage de la réparation est le suivant :

- Fabrication des blocs d'ancrage et des déviateurs de précontrainte, avec réservations pour les gaines longitudinales et les barres de clouage.
- Mise en place des barres de clouage, en évitant la précontrainte présente dans les âmes.
- Chargement du viaduc avec un convoi normalisé pour ouvrir les fissures.
- Injection des fissures dont l'ouverture dépasse 0.3 mm.

- Mise en place des gaines de précontrainte longitudinale (PEHD) entre les déviateurs.
- Mise en place des câbles de précontrainte dans les gaines.
- Mise en tension.
- Injection des câbles.
- Changement des appuis de culées

Les études d'exécution

Les études d'exécution ont été réalisées par le bureau d'études ARCADIS de Lyon.

Ces études se sont basées sur les conclusions faites par le CETE ainsi que sur un relevé 3D de la géométrie de l'ouvrage et les plans d'exécution de l'époque.

Grâce à la connaissance du phasage de construction (déterminé par le CETE), le BE ARCADIS a pu effectuer un recalcul complet du tablier avec la précontrainte existante, puis un autre en insérant les câbles additionnels. Les figures 7 et 8 montrent l'effet de la réparation sur l'enveloppe des contraintes en fibres inférieures (ELS rare).

Il apparaît que la précontrainte additionnelle permet d'éliminer quasiment toute traction dans la fibre inférieure du tablier. La traction restante peut être reprise par les armatures passives.

Les massifs d'ancrage sur les travées de rive ont nécessités des études approfondies pour vérifier le passage des vérins et des ouvriers dans cette zone, pour positionner les clous dans l'âme du viaduc et pour vérifier la distribution des efforts entre la précontrainte additionnelle et l'âme. Pour vérifier ce dernier point, un calcul aux éléments finis a été mené, qui a permis de valider :

- les massifs en compression et l'interface massif / caisson.
- les sections courantes de voussoir sous diffusion de la précontrainte.
- la vérification des effets d'entraînement.

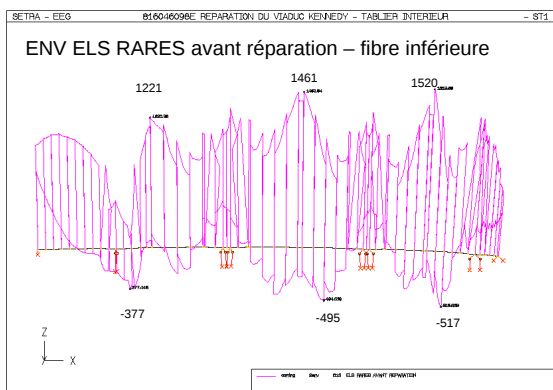


Figure 7 - Enveloppe ELS rares avant réparation

Les manifestations régionales

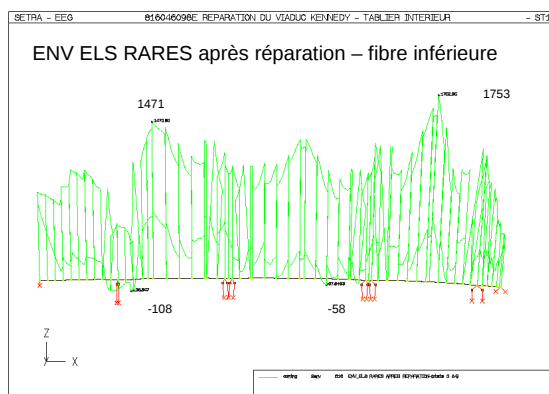


Figure 8 - Enveloppe ELS rares après réparation

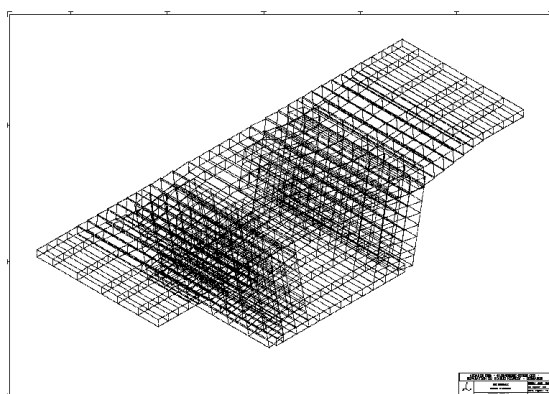


Figure 9 - Modélisation EF des massifs d'ancrage

Durant la phase de chantier, les plans d'exécution ont dû être adaptés en permanence pour éviter les câbles de précontrainte existants, qui n'étaient pas toujours positionnés comme sur les plans de l'époque.

4. Le chantier

Les travaux de réparation ont été faits par l'entreprise Freyssinet.

Le marché prévoyait de faire les travaux en deux tranches, l'une ferme concernant l'ouvrage extérieur, l'autre conditionnelle concernant l'ouvrage intérieur. Finalement, les deux tranches ont été réalisées.

Difficultés de réalisation

Ce chantier a présenté beaucoup de difficultés de réalisation comme par exemple :

- Franchissement de voies non fermées à la circulation (chemin de halage, voie ferrée, canal) qui ont posées des problèmes d'installation de chantier et de cheminement
- Hauteur à l'intérieur de l'ouvrage ne permettant pas de se tenir debout (1.6 m)
- Travaux pénibles dans un espace confiné (bouchardage, coffrage, ferrailage, carottage...)
- La position réelle de la précontrainte dans les âmes ne correspondait pas toujours avec la position dessinée sur les plans.

Pour connaître la position exacte des armatures et des câbles, l'entreprise a fait appel à la technologie Radar et à l'utilisation du Pacomètre. Il s'est avéré que le Radar n'était pas assez précis pour cet usage, et la position d'une armature n'était décelée qu'à quelques centimètres près, ce qui était insuffisant pour réaliser des carottages.

Les travaux

Les premiers travaux ont consisté à créer une trappe d'accès dans le hourdis inférieur pour l'approvisionnement en matériel et matériaux, ainsi qu'au nettoyage haute pression de l'extérieur de l'ouvrage.

La trappe permettait entre autre de rentrer les vérins à l'intérieur de l'ouvrage à l'aide du palan.

Ensuite, il a fallu faire le repérage des armatures existantes (passives et précontraintes), puis l'implantation des carottages (âmes, déviateurs existants).

Après avoir réalisé le coffrage et le ferrailage des massifs d'ancrages, des cheminées de bétonnages ont été ménagées dans le hourdis supérieur. Ces cheminées permettent à la fois le coulage et la vibration du béton.



Figure 10 - Ferrailage d'un massif d'ancrage

La phase suivante a été l'injection des fissures, après avoir mis l'ouvrage en charge. Cette procédure, recommandée par le CETE, permet de mettre l'ouvrage en tension dès l'application de précontrainte dans les nouveaux câbles, et d'éviter qu'une partie de la précontrainte rajoutée ne serve qu'à refermer les fissures.

La phase des travaux suivante consistait à changer les appareils d'appuis de culée. Du côté Sud, le vérinage a été réalisé à l'aide de vérins plats disposés sur la culée.

Sur la culée Nord, du fait des appuis « négatifs » (voir figure 2), il a été nécessaire d'opérer en deux phases :

Dans un premier temps, charger certaines travées pour décharger les appuis négatifs et ainsi pouvoir les changer.

Dans un second temps, changer les appuis positifs par vérinage.

Les manifestations régionales

D'autres travaux de restauration ont été nécessaires, tels que la réparation des corbeaux d'appuis des réseaux (entre les deux ouvrages), la réfection des barrières de sécurité, la réfection des ancrages de candélabres...

La première tranche a servi d'essais, et sa réalisation a été plus longue que prévue, avec un grand nombre de difficultés à résoudre. L'expérience acquise lors de la première tranche a servi pour la seconde, les difficultés ont été surmontées plus facilement, pour finalement respecter le délai global fixé par le maître d'œuvre.

Expérience acquise lors de ce chantier

L'entreprise retire plusieurs enseignements après réalisation de ce chantier :

- La gammagraphie est une méthode d'auscultation plus appropriée que le Radar pour la localisation des armatures dans un ouvrage. Il aurait été préférable de l'utiliser pour cet ouvrage.
- Le remplacement des appareils d'appuis aurait nécessité une étude plus approfondie.
- Il faut favoriser la conception d'éléments simples à réaliser en conditions de chantier (massifs d'ancrages, accès par le hourdis supérieur...)

Quelques dates et chiffres :

Dates:

Marché lancé en :	Mars 2005
Remise des offres :	4 Avril 2005
Notification :	27 Mai 2005
Ordre de service tranche ferme :	27 Juin 2005
Ordre de service tranche conditionnelle :	6 Mars 2006

Délais d'exécution :

Tranche ferme:	8 mois
Tranches conditionnelles 1 :	8 mois
Tranches conditionnelles 2 et 3 :	6 semaines

Délais par tranches :

Période de préparation :	3 mois	} 8 mois
Remise du PPSPS :	1 mois	
Délais des travaux :	5 mois	
Remise de documents:	2 mois	

Objectif de mise en service de l'ouvrage int. le 06/11/06

Chiffres :

Tranche ferme :	913 253.64 € TTC
Tranche conditionnelle 1 :	1 203 976.53 € TTC
Montant total :	2 117 230.17 € TTC

Conclusion

La restauration d'un ouvrage tel que le viaduc Kennedy est un travail de longue haleine. Une étude approfondie doit être réalisée pour savoir si les dégradations observées sont réparables, pour ensuite déterminer si

ces réparations sont justifiées financièrement. Deux autres ouvrages de la ville de Dijon, comparables au viaduc Kennedy, mais en plus mauvais état ont été détruits après la période d'auscultation.

Ces réparations ne sont quasiment pas visibles de l'extérieur, ce qui rend leur justification mal aisée vis-à-vis des élus et de l'opinion publique. De plus, elle nécessite une forte mobilisation des services techniques de la ville (maîtres d'œuvre), au détriment d'autres travaux pendant la période de chantier.

Ce type de réparations présente un grand intérêt technique sur plusieurs points :

- sur les investigations, qui ont permis de déterminer les causes des pathologies ;
- sur les études d'exécution ;
- sur les moyens de réparation mis en œuvre.

Merci à tous les acteurs qui sont intervenus pour la restauration de cet ouvrage et qui ont su communiquer leur intérêt pour ces travaux et leur passion pour le Génie Civil lors de cette conférence - visite.

Merci à tous les participants.

Compte rendu réalisé par Hulpa MARLIN, étudiant en 5ème année à l'INSA de Lyon.

Les manifestations régionales

Les acteurs de la réparation du viaduc Kennedy

Maître d'ouvrage	Ville de Dijon	Mr PINON
Maître d'œuvre	Direction de la voie publique et des déplacements de la ville de Dijon	Mr VAUSSANVIN Mr LEIMBACHER Mr DERAÏN Mr PAULIN Mr BERGER
Bureau d'étude	Cellule Voirie	Mr JULIEN Mr GENELOT
Contrôle extérieur étude	CETE de Lyon	Mr RESPLENDINO Mr BOUTEILLE
Contrôle extérieur conception	CEBTP Dijon	Mr FERLAND Mr HENRY Mr MELECKI Mr LAFENETRE
SPS	NORISKO	Mr CHALICARNE
Entreprise	FREYSSINET	Mr LOUE Mr AMMAR Mr AFONSO
Bureau d'études entreprises	ARCADIS	Mr VASSORD Mr ELLO Mr KOUBI

Figure 11 - Les acteurs de la réparation du viaduc Kennedy