

19 et 20 septembre 2005 à Perpignan Le renouveau des ponts en arc

La délégation Méditerranée de l'Association Française de Génie Civil a organisé les 19 et 20 septembre 2005 une manifestation consacrée au renouveau des ponts en arc.

Ces deux journées qui ont permis d'accueillir une soixantaine de participants se sont déroulées dans d'excellentes conditions grâce bien sûr à la qualité des intervenants, bénévoles, au beau temps dont nous avons bénéficié et surtout grâce à la qualité de l'hospitalité du Conseil Général des Pyrénées orientales. Les conférences se sont tenues en présence de M. Olive, Conseiller Général président de la commission des travaux publics, dans le cadre prestigieux du Palais des Rois de Majorque. M Olive nous avait accueilli au préalable au nom du président du conseil général. Ce Palais-forteresse gothique propriété du Département a été construit dans la deuxième partie du XIIIème siècle par le roi Jacques II de Majorque, transformé en citadelle au XVIème siècle par Charles Quint et Philippe II d'Espagne, citadelle encore renforcée par Vauban après le traité des Pyrénées (1659). En début de soirée le groupe a pu visiter le Palais sous la conduite de JF Guyonnet directeur des services du Conseil Général. Après un apéritif offert par le président de l'assemblée départemental C. Bourquin qui nous a honorés de sa présence, la journée s'est terminée par un buffet servi dans une salle du Palais.



Le Palais des Rois de Majorque

Rappel du programme

19 septembre 2005

- 14h30 Accueil des participants au Palais des Rois de Majorque par M. Olive
- 14h45 Présentation des deux journées
par Marcel Basso, Président de l'AFGC Méditerranée
- 15h00 **La nouvelle génération des ponts bows-strings métalliques**
par Jacques Berthelémy (SETRA)

Exemple d'application : le projet du pont sur le Roboul

- 16h00 **Le point de vue de la Maîtrise d'Oeuvre**
par M. Martin (CG 66)
- 16h15 **Le point de vue des entreprises :**
La charpente métallique
par M. Gauthier (URSSA)

Le génie civil
par Michel Placidi (RAZEL)
- 17h30 **Visite de l'ouvrage**
- 19h30 **Visite commentée du Palais des Rois de Majorque**
par M. Reynal
- 20h30 Apéritif et buffet au Palais des Rois de Majorque

20 septembre 2005

- 8h30 Accueil des participants au Palais des Rois de Majorque
- 9h00 Présentation de la journée
par Marcel Basso, Président de l'AFGC Méditerranée
- 9h15 **Le renouveau des ponts en arcs**
par Michel Virlogeux, Consultant

Exemple d'application : le projet du pont sur le Tech à Reynès

- 10h30 **Eléments architecturaux**
par Frédéric Zirk, Architecte
- 10h45 **Le point de vue de la Maîtrise d'Oeuvre**
par M. Panabière (CG 66)
- 11h00 **Le point de vue des entreprises :**
La charpente métallique
par M. Piquée (EIFFEL)

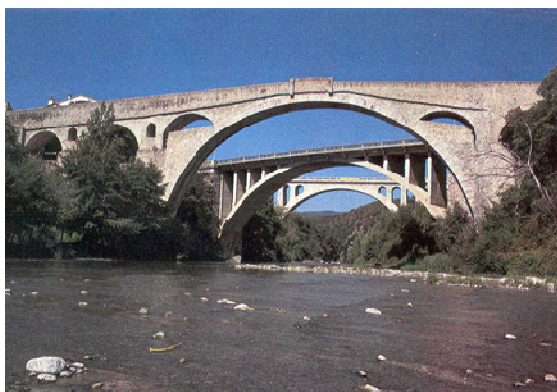
Le génie civil
par Michel Placidi (RAZEL)
- 12h15 Déplacement vers Reynès
- 12h45 Arrêt sur les trois ponts de Céret (ouvrage d'art datant de 1336)
- 13h15 Repas pris en commun
- 15h30 **Visite de l'ouvrage**
- 19h00 retour au Palais des Rois de Majorque

Déroulement des journées

Le programme de cette manifestation régionale consacrée au renouveau des ponts en arc s'articulait en deux parties :

L'après-midi du 19 septembre consacrée aux ponts en arc auto ancrés (ou en franglais bow-string dont l'évolution a été présentée par J. Berthelémy avec l'exemple de celui du pont sur le Roboul visité en fin d'après-midi.

La journée du 20 septembre consacrée elle aux ponts en arc, y compris ceux à béquille dont le renouveau fut commenté par Michel Virlojeux et attesté par l'exemple du pont de Reynes dont le chantier fut visité l'après-midi. Au passage, profitant d'un déjeuner pris à Céret, le groupe a pu admirer le très célèbre pont de Céret, grande voûte de 45 mètres construite de 1321 à 1341, avec en amont deux successeurs en arc : celui ferroviaire construit de 1883 à 1889 et le routier mis en service en 1935.



Les Ponts de Céret



Vue aérienne des Ponts de Céret

DEMI-JOURNÉE SUR LES PONTS AUTOANCRÉS

Jacques Berthelémy a présenté tout d'abord un brillant exposé sur l'histoire des ponts auto ancrés en l'illustrant notamment par les références un pont de Riesa en Saxe (1878, 3 travées de 101 mètres avec des suspentes croisées), le « bow string » historique des frères MADERSPACH à Russberg EN Hongrie (4 arcs en fonte sous bandés par une chaîne au niveau du tablier). Pour la France le Pont de CASTELMORON (1932- 140 m, ossature mixte avec l'originalité d'une poussée résiduelle sur les culées), le Pont de Neuville sur l'Oise (portée 82,3 m, conçu par M. Grelu, avec des suspentes en tubes d'acier laminés avec des fixations

par boulons HR à leurs extrémités), pour l'Europe des ponts de Hermalle en Belgique (1986- 138 m) de Dömitz sur l'Elbe (1993, 178 m), au Japon de nombreux arcs auto ancrés métalliques allant jusqu'à des portées de 250 m (NISHINOMIYA et SHINHAMADERA).

Il a ensuite abordé une forte intéressante analyse de domaine économique d'emploi, résumée dans le graphique ci-dessous comparant Warner et Bows-strings

Il a insisté sur l'intérêt d'une mise en œuvre (au besoin lancement avec appui mobile) entièrement terminé selon le schéma statique final et souligné diverses particularités de conception : intérêt lorsque le gabarit le permet des arcs en anse de paniers inclinés, se rejoignant au sommet, le délicat arbitrage du point de vue architectural entre épaisseur de l'arc et celle du tirant, l'intérêt des suspentes radiales pour simplifier l'accrochage sur l'arc, la meilleure diffusion des efforts dans l'arc avec des suspentes triangulées (point de vue que Michel Placidi ne partage pas entièrement) ...

Les participants ont bénéficié de la remise de trois articles de J. Berthelémy dont un remarquable sur les ponts routiers en arcs auto ancrés, l'autre sur le délicat problème du réglage des suspentes en introduisant le concept de « tension de référence », illustré par la passerelle piétons de Montigny et le dernier article sur le pont du Roboul, qui a eu l'honneur d'être présenté au 6^{ème} symposium de Munich sur les ponts en septembre 2005.

Le pont sur le Roboul

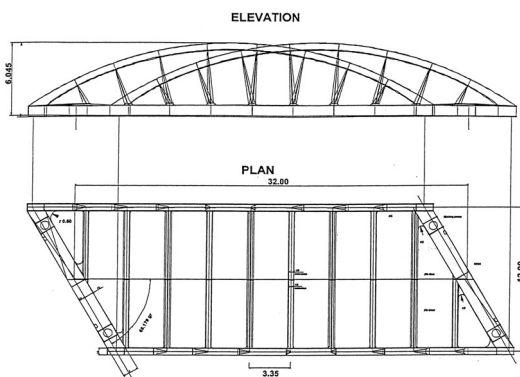
Ce petit ouvrage auto ancré de 32 m de portée remplace un ouvrage en maçonnerie à deux travées construit en 1867 avec une seule travée et auquel une deuxième a été rajoutée en 1888 pour insuffisance hydraulique. Ainsi que rappelé par J.Martin, directeur des routes du Conseil Général 66, une reconstruction, pour insuffisance géométrique et hydraulique s'est inscrite dans une opération d'amélioration de l'important axe E-O que constituent pour le département les RD 12 et 18 (7000 véh/j, 14% de PL), pour un coût de 890.000 Euros TTC (y compris accès), soit : 2.875 Euros TTC/m²

La circulation avait bien sûr été maintenue pendant les travaux de reconstruction, grâce à un gué bétonné.

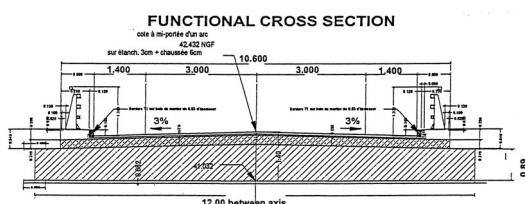


Le nouveau pont sur le Roboul

Au préalable, J. Berthelley, au titre de l'association du SETRA à ce projet, avait présenté les grandes lignes de la conception de ce petit chef d'œuvre, en soulignant combien l'arc auto ancré s'accommodait d'un fort biais (66 grades) et de l'aléa sismique (butées antisismiques au droit des appuis).

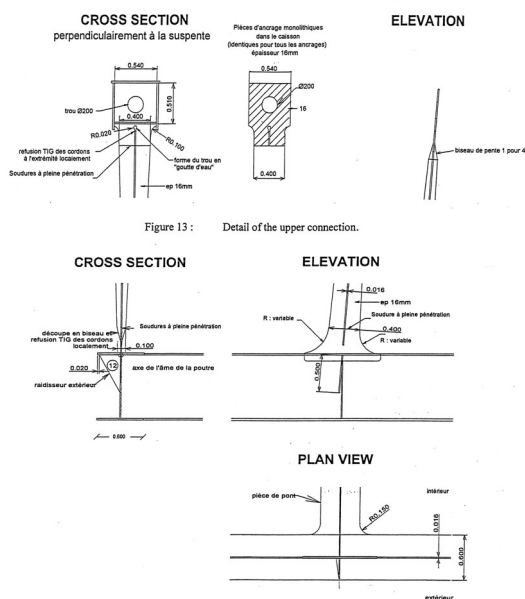


Élévation et plan



Coupe transversale

Il a en outre insisté sur les caractéristiques des suspentes en plats soudés, dont deux peuvent être remplacées sans restriction de trafic.



Détails des suspentes

En l'absence de M. Gauthier de la Société URSSA chargée de la partie métallique, c'est Michel Placidi de l'Entreprise RAZEL qui a présenté la construction de l'ouvrage.

Après un montage à blanc de l'ossature métallique dans l'usine du pays basque, l'ouvrage a été construit en place, sans appui provisoire intermédiaire (risques liés aux crues) à partir du lancement des poutres-tirants.

L'aléa sismique (zone Ib) a été bien sûr dimensionné le ferrailage (200 Kg/m³) des 2 pieux fores Ø 1200 mm longueur 10,5 m de chaque ligne d'appui. La dalle coulée en place, à l'avancement dans un seul sens, simplement armée (238 kg/m³) n'est connectée qu'aux pièces de pont. Seuls les tirants avaient été construits avec une contre flèche.

JOURNÉE SUR LES PONTS EN ARC

Michel Virlogeux a présenté, avec son talent habituel un panorama de l'évolution des ponts en arc ces deux dernières décennies, en puisant dans son trésor de quelques 70 000 diapositives relatives aux ouvrages d'art. A noter pour l'anecdote, que le recours partiel à un carrousel américain et un beau soleil catalan ont quelque peu perturbé la présentation, en mobilisant les énergies des agents du conseil général. En attendant de pouvoir accéder peut être un jour sous forme de DVD commenté à cette riche collection, les quelques lignes ci-dessous ne sont qu'un reflet médiocre et non illustré de ce brillant exposé.

Il a situé vers les années 80 ce renouveau des ponts en arc avec les constructions en encorbellement (pont de KrK), mais aussi les ouvrages à béquille, tels que le pont de la rivière AUREE avec un caisson unique et des béquilles précontraintes divergentes, articulées à leur base (architecte FRALEU). L'articulation était constituée d'une rotule en acier inoxydable sur platine en acier avec feuille inox supérieure et téflon. Avec les années le téflon a flué.

Dans la longue liste des ouvrages ultérieurs, il a présenté notamment le pont de Trellins sur l'Isère, construit en encorbellement avec haubans (Concepteur M Placidi), le pont sur la Rance avec ses 260 m (douzième arc mondial à l'époque), avec malheureusement les naissances dans l'eau à marée haute, l'arc de 200 mètres sur la Vilaine, sous forme de caisson béton, avec un tablier supérieur en ossature mixte porté par des pilettes.

En ce qui concerne la forme de l'arc, celui en tube métallique d'Entrenas sur A 75 a montré qu'une approximation segmentale était tout à fait acceptable. Ont été également évoqués parmi bien d'autres le pont de Limoges avec ses arcs dédoublés construits sur cintre à section en L et ses contre béquilles, le projet de pont de Gignac (A 750) à proximité du célèbre arc de Garipuy sur l'Hérault : ouvrage à béquilles, avec contre béquille générant des tractions dans le tablier, le pont en arc d'Altiani, à proximité d'un pont génois du

XVII^e siècle, avec son nœud central dédoublé, des articulations complexes en pied et une épaisseur de seulement 50 cm aux naissances.

La deuxième journée a été consacrée au pont en arc de Reynes sur le Tech, avec les exposés le matin de MM Panabière (CG 66)), Piquée (Eiffel), Borde (RAZEL), Placidi (RAZEL) et Zirk (architecte de l'opération) et la visite du chantier l'après-midi.

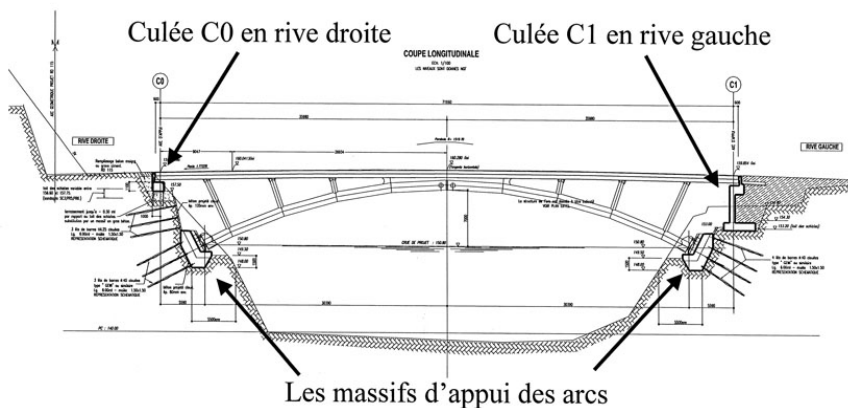
Michel Panabière a fait un court historique du pont métallique de Reynes encore actuellement en service : construit en 1893, c'est un ouvrage à poutres latérales treillis, à la fois à l'origine ferroviaire (tablier supérieur) et routier (tablier inférieur à voie unique, avec 2 travées biaisées de 60 m. L'ouvrage actuel, outre son faible niveau de service (voie unique de 3 m, limitation de charge à 10 tonnes présente de nombreux désordres, liés à la corrosion.

Il a ensuite présenté, en tant que maître d'œuvre l'opération du nouveau pont, pour lequel le conseil

général a voulu un ouvrage original, sans appui dans le Tech. Michel Virlojeux a été associé comme le conseil dès le début des études qui se sont rapidement orientées vers une solution en arc. C'est l'entreprise RAZEL qui a été lauréate avec un marché de 2,3 M euros TTC. Les études d'exécution et les terrassements des culées ont conduit à quelques surcoûts (augmentation d'épaisseur des pilettes tubulaires pour tenir compte de la fatigue, clouages au rocher en rive droite). Au final le coût au m² TTC ressort à 3400 E/m² environ. La construction de cet ouvrage exceptionnel a été largement médiatisée localement par le conseil général (visites du chantier, articles, projet pédagogique avec des enseignants).

M. Piquée a présenté la construction de l'ossature métallique à l'usine de Lauterbourg avec deux montages à blanc. Les deux arcs sont en tube, diamètre 1200 mm et les pilettes rayonnantes et inclinées en tube diamètre 600 mm.

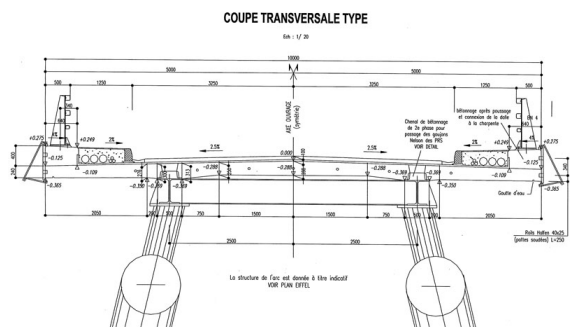
Coupe longitudinale



Coupe longitudinale de l'ouvrage



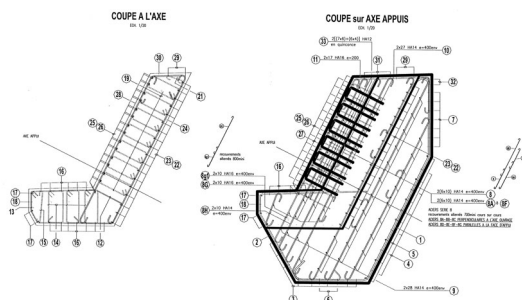
Photo demi-arc levé



Coupe transversale de l'ouvrage

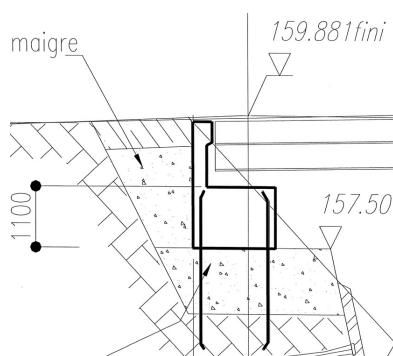
La mise en place de l'ossature s'est faite par basculement des deux demi arcs à partir de grues placés dans le lit du Tech (2 jours).

M. Borde de la Société RAZEL a présenté ensuite la réalisation des appuis constitués au niveau inférieur des culées des arcs et au niveau supérieur de celles du tablier. La rive droite très accidentée a posé quelques problèmes d'accès et de terrassement. Il a fallu mettre en œuvre des ancrages de 6 mètres (diamètre 25 à 40 mm) non prévus initialement. Les appuis des arcs sont des semelles superficielles au rocher renforcé par des ancrages $\varnothing$ 40 mm de 6 m de long et reliées par un tirant reprenant la composante horizontale de la poussée des 2 arcs. Ce tirant, dans sa forme architecturale finale est désolidarisé du massif rocheux par une plaque de polystyrène.



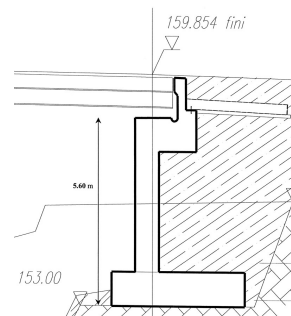
Coupe sur axe appui arc

L'ouvrage étant en zone de sismicité II, outre la prise en compte du séisme de référence dans le dimensionnement de la structure, les culées d'appui du tablier ont été munies de butées anti-sismiques reprenant un effort de 240 T. Pour la culée C1 en rive gauche, il a été également procédé à une prise en compte du risque de rupture du sol par la méthode de MONOBE-OKABE.



Coupe culée C0 (rive droite)

- Simple sommier avec garde-grève et murs latéraux
- Utilisation gros béton après purge du rocher de surface altéré
- Mise en place de clous (aciers verticaux) pour éviter tout risque de glissement de la culée au séisme transversal ($F_{trans} = 240 \text{ t}$ sur butée sismique)



Coupe culée C1 (rive gauche)

Lors de la construction de l'ossature métallique, les arcs reposaient sur une articulation supérieure provisoire d'axe horizontal permettant la rotation pour leur mise en place. En position finale ils reposent sur des appareils d'appui à pot.

Michel Placidi a présenté ensuite avec sa verve et sa clarté habituelles la réalisation par poussage du tablier supérieur. Après avoir rappelé les inconvénients et les difficultés du coulage en place ou des dalles préfabriquées avec réservations (connexion discontinue, mauvais contact, multiplication des joints), il a développé les techniques de poussage qui outre l'amélioration de la sécurité des ouvriers permettent de réduire, voire supprimer les problèmes de microfissuration liés au retard gêné et au chargement. En effet, la réalisation d'une connexion différée permet un chargement préalable quasi complet de la charpente et évite l'effet d'une bonne partie du retrait de la dalle.

Trois méthodes de dalle poussée se sont succédées :

- Le poussage de la dalle béton avec réservations.

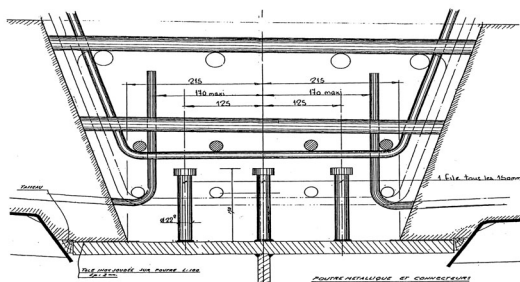
Les connexions sont ensuite soudées, avec quelques difficultés dans les fenêtres, obstruées au final avec un béton sans retrait.

- Le poussage avec une tôle inférieure connectée à la dalle glissant sur la semelle supérieure de l'ossature métallique. Les deux tôles, d'épaisseur totale surdimensionnée, sont ensuite solidarisées par des soudures délicates en plafond.

- Le poussage « Razel » breveté et ayant bénéficié pour sa troisième génération de la charte de l'innovation. Il consiste à découper le hourdis supérieur en trois parties distinctes, reliées uniquement par les armatures, constituant ainsi en final sur la poutre métallique d'appui une longrine filante assurant une connexion continue, selon des modalités variables en fonction de la « génération » de la technique (CF ci-après). Les connecteurs sont soudés à la charpente en usine et le remplissage de la longrine de connexion est réalisé avec un béton spécial à faible retrait.

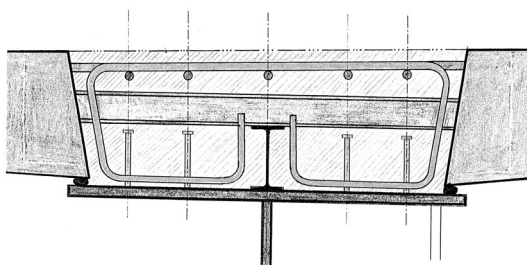
Cette technique « Razel » a déjà connu trois « générations ». Dans la première mise en œuvre pour le viaduc d'accès au pont sur le canal de Tancarville (A29),

le béton frottait directement sur la charpente, les encorbellements préfabriqués étant tenus par deux nappes d'acier passif.



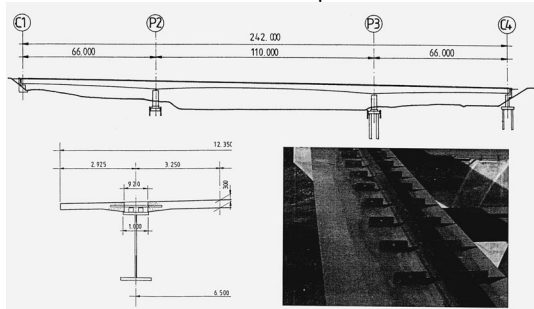
Détail longrine première génération.

Dans « la seconde génération », la résistance transversale bénéficie d'une précontrainte, les encorbellements sont tenus par des profilés transversaux, qui se déplacent sur un rail lié à l'ossature.



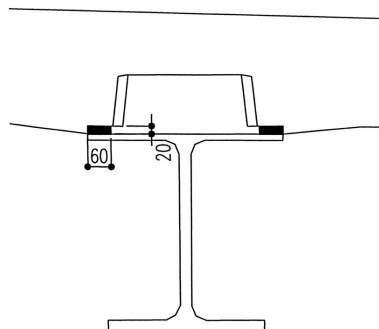
Détail longrine deuxième génération

Ont été notamment réalisée selon cette technique le viaduc de Varenne, le pont sur le Fier à Annecy, le pont de Brioude sur l'Allier et le pont sur l'Orne à Caen.

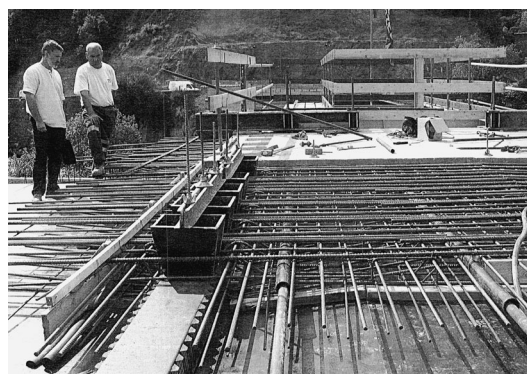


Élévation et coupe du pont sur l'Allier à Brioude

Dans la « troisième génération » mise en œuvre pour la première fois au pont de Reynes et retenue par la charte de l'innovation, il n'y a plus de rail de glissement, ni de profilés transversaux supports, ni de précontrainte transversale. Il est créé un tunnel de connexion continu avec des multiples clés sur les faces latérales et des tenons verticaux servant de fenêtres de bétonnage. Le béton glisse sur deux plats en CESTILENE HD 500 (épaisseur 20 mm, largeur 60 mm). La connexion est donc assurée en deux temps : charpente à longrine béton par les goujons, longrine béton à dalle préfabriquée par les clés et tenons.



Détail du dispositif de glissement



Ferrailage et réservation sur l'aire de préfabrication

Les dalles ont été préfabriquées par tronçon de 5 m à l'arrière de la culée C1 rive gauche, sans encorbellement pour les deux premiers tronçons. Le poussage est assuré par deux couples de 2 verins de 38 tonnes, de course 50 cm prenant appui sur les poutres métalliques à forte inertie du coffrage par l'intermédiaire de crémaillères. Ces poutres sont dans le prolongement des PRS. Le dispositif a été dimensionné pour un coefficient de frottement de 30%. Les effets de poussage restent internes à la structure et ne transmettent aucun effort horizontal aux arcs ou aux fondations.

Par contre la détermination des efforts de flexion longitudinale dans la dalle lors du passage est assez complexe, en raison de la souplesse de la structure portante, de la rigidité et du phasage de la dalle béton. C'est le programme PUSH de Michel Marchetti qui a été utilisé pour trouver à chaque phase par itération l'équilibre entre la structure poussée et ses appuis, puis à partir des réactions d'appui déterminer les sollicitations dans la dalle. En effet, la charpente métallique est simulée à travers un grand nombre d'appuis faiblement espacés, avec des caractéristiques convenables. C'est la notion « d'appuis élastiques couplés ». L'ensemble des valeurs numériques caractérisant la souplesse de ces appuis et leur interaction constitue la matière de souplesse, obtenue par un programme du type ST1. Dans le cas du pont de Reynes avec les 82 appuis retenus, cette matinée symétrique comprenait $82^2 = 6724$ termes.

Toutes les phases de poussage ont ensuite été représentées par l'outil de calcul « PUSH ». Lors du vérinage pour mise sur appui définitif des arcs, il a été procédé à une compensation de 40 mm pour retrouver le rayon final de 1529 m.

M. Zirk architecte en charge de l'ouvrage a développé enfin avec clarté à partir de photomontages et de croquis, les idées de composition qui l'ont guidé : assurer la cohérence avec l'ancien pont, qu'il est prévu de conserver, promouvoir des pilettes rayonnantes, en s'inspirant d'exemples tels que la passerelle de « Jaffé » à Périgueux.

Après le repas pris à Céret, le groupe a pu admirer la grande voûte du 14^{ème} siècle, avec une vue perspective sur les deux autres franchissements du Tech à l'amont. La journée s'est terminée par une visite de chantier, qui en était à la phase de préfabrication et poussage du tablier.

*Compte rendu rédigé par Marcel Basso
Président Délégation Méditerranée*

