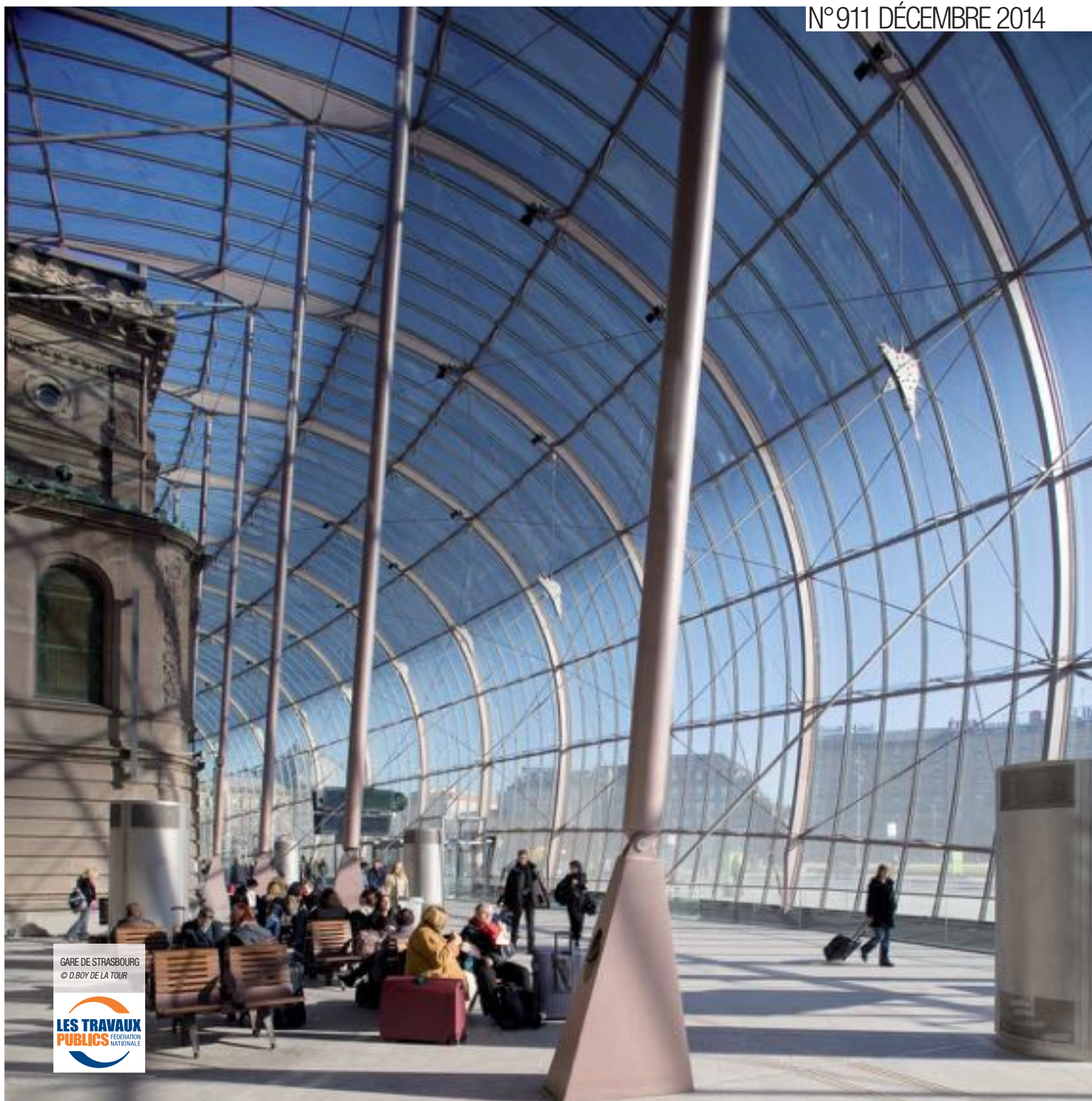


TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

PATRIMOINE ET REHABILITATION. NOTRE-DAME DES GRACES A TOULOUSE. EGLISE SAINT-GERMAIN DE CHARONNE. VOIRIES SOUTERRAINES DES HALLES A PARIS. MEMORIAL DE NOTRE-DAME-DE-LORETTE. HOTEL ROYAL A EVIAN-LES-BAINS. DIAGNOSTIC DE COMPORTEMENT ET D'ETAT D'OUVRAGES D'ART EN MACONNERIE. REHABILITATION D'UN DEPOT DE RESIDUS POLLUES. 4 VIADUCS DE TYPE EIFFEL EN AUVERGNE. BATEAU-PORTE A MARSEILLE. NOUVEAU PONT A BEAUVAIS. TRESORS DE NOS ARCHIVES : VIADUC DE CARONTE

N°911 DÉCEMBRE 2014



GARE DE STRASBOURG
© D. BOY DE LA TOUR



Directeur de la publication
Bruno Cavagné

Directeur délégué
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03
morgenthalerm@fntp.fr

Comité de rédaction
Hélène Abel (Ingérop), David
Berthier (Vinci Construction France),
Sami Bounatirou (Bouygues TP),
Jean-Bernard Datry (Setec), Philippe
Gotteland (Fntp), Jean-Christophe
Goux-Reverchon (Fntp), Laurent
Guilbaud (Saipem), Ziad Hajar
(Eiffage TP), Florent Imberty
(Razel-Bec), Claude Le Quéré (Egis),
Stéphane Monleau (Soletanche Bachy),
Jacques Robert (Arcadis), Claude
Servant (Eiffage TP), Philippe Vion
(Systra), Michel Morgenthaler (Fntp)

Ont collaboré à ce numéro
Rédaction
Monique Trancart, Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente
Com et Com
Service Abonnement TRAVAUX
Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot
92350 Le Plessis-Robinson
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22
Fax +33 (0)1 40 94 22 32
revue-travaux@cometcom.fr

France (9 numéros) : 190 € TTC
International (9 numéros) : 240 €
Enseignants (9 numéros) : 75 €
Étudiants (9 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)

Publicité
Rive Média
2, rue du Roule - 75001 Paris
Tél. 01 42 21 88 02 - Fax 01 42 21 88 44
contact@rive-media.fr
www.rive-media.fr

Directeurs de clientèle
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04
b.cosson@rive-media.fr
Carine Reininger - LD 01 42 21 89 05
c.reininger@rive-media.fr

Site internet : www.revue-travaux.com

Édition déléguée
Com'1 évidence
Siège :
101, avenue des Champs-Élysées
75008 PARIS
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52
revuetravaux@com1evidence.com

La revue Travaux s'attache, pour l'information
de ses lecteurs, à permettre l'expression de
toutes les opinions scientifiques et techniques.
Mais les articles sont publiés sous la
responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur
se réserve le droit de refuser toute insertion,
jugée contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale
ou partielle, France et étranger, sous quelque
forme que ce soit, sont expressément réservés
(copyright by Travaux). Ouvrage protégé ;
photocopie interdite, même partielle
(loi du 11 mars 1957), qui constituerait
contrefaçon (code pénal, article 425).

Editions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0116 T 80259
ISSN 0041-1906

LA SCIENCE DE L'EXISTANT



© DR

Si l'on considère que toute structure est susceptible d'être vouée à la ruine dans un temps certain, fût-elle bien conçue, bien calculée, bien réalisée et bien contrôlée en son temps, il est de notre devoir d'entretenir et de maintenir nos ouvrages dans un état de service suffisamment correct pour leur permettre d'assurer en toute sécurité leurs fonctionnalités.

« Nous n'héritons pas en effet de notre patrie, mais nous l'empruntons aux générations futures ». Cette citation de Saint-Exupéry prend tout son sens aujourd'hui à une époque où l'âge moyen de nos ouvrages est élevé.

En effet, si les caractéristiques des matériaux évoluent peu, les ouvrages sont sujets aux agressions de tous ordres et confrontés parfois aux conséquences de défauts d'exécution. Les errements des premiers règlements de calcul ont conduit à des insuffisances structurelles de bon nombre d'ouvrages qui ont parfois subi des logiques d'exploitation qui n'ont pas toujours laissés la traçabilité suffisante pour aider l'ingénieur dans sa tâche ardue de compréhension des phénomènes ; et ce sans compter que les dossiers d'ouvrage ont bien trop souvent disparu.

La conjonction de tous ces facteurs, pour ne citer que ceux-là, rend souvent le diagnostic complexe. Retrouver le schéma initial de fonctionnement et, le cas échéant, ses modifications pour comprendre l'origine des désordres, devient alors un des objectifs des ingénieurs.

Les diagnostics, qui doivent être de qualité, prennent alors une part importante dans la recherche et l'identification des causes des désordres, avant de traiter les conséquences.

C'est là où le savoir-faire de l'ingénieur prend tout son sens, puisant généralement dans son expérience pour comprendre et apporter des solutions pragmatiques à ces problèmes.

L'ingénierie publique et son précieux réseau scientifique et technique, qui longtemps maîtrisèrent ce domaine spécifique, sont voués à un avenir très incertain au gré des réorganisations et des réductions générales des politiques publiques et budgétaires.

Pour pallier ces manques, il existe aujourd'hui un corpus technique, parfois ancien, sur le sujet : les instructions techniques ministérielles et quelques précieux guides de l'AFGC, du LCPC et du SETRA. Les fascicules du STRRES, plus récents, sont reconnus et appliqués dans la profession, mais les cursus de formation initiaux sont encore rares, excepté la filière IMRO d'Égletons et les cours dans quelques écoles d'ingénieurs spécialistes.

La profession s'est ainsi employée depuis plusieurs années, au sein de l'IMGC, à fédérer ce métier spécifique. Au sein d'un des groupes de travail, l'idée d'une option CHEMER (Centre des Hautes Études de la Maintenance et de la Réhabilitation) a pris forme au sein du CHEC (Centre des Hautes Études de la Construction), afin de donner à la profession ce souffle nouveau, dans l'esprit des prestigieuses sections CHEBAP et CHEM qui ont donné de nombreux et brillants ingénieurs à notre profession depuis sa création en 1957.

Même si le soutien de la profession et des entreprises doit encore s'accroître pour pérenniser cette idée nouvelle de formation, gageons que l'avenir viendra des jeunes pour préserver notre beau patrimoine, dans des conditions économiques et politiques qu'on leur souhaite moins difficiles au quotidien.

CHRISTOPHE RAULET
DIRECTEUR GÉNÉRAL DE DIADÈS - GROUPE SETEC
MEMBRE DU CA DE L'IMGC ET DU CONSEIL DE PERFECTIONNEMENT DU CHEC

COMPOSER L'ESPACE POUR LES GENS D'UNE ÉPOQUE

JEAN-MARIE DUTHILLEUL A UN PARCOURS SINGULIER PARMIS LES ARCHITECTES CONTEMPORAINS. ARCHITECTE ET POLYTECHNICIEN, IL A ÉGALEMENT ÉTUDIÉ LA PHILOSOPHIE. SON POSITIONNEMENT PROFESSIONNEL EST ORIGINAL. IL A CRÉÉ AREP AVEC ÉTIENNE TRICAUD, UN BUREAU D'ÉTUDES PLURIDISCIPLINAIRE DE PLUS DE 600 PERSONNES AU SEIN DU GROUPE SNCF, QUI S'INVESTIT DANS LA CRÉATION DE NOMBREUSES GARES ET DE L'AMÉNAGEMENT URBAIN QUI EN DÉCOULE, EN FRANCE TOUT COMME À L'ÉTRANGER.
ENTRETIEN AVEC JEAN-MARIE DUTHILLEUL. PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



© MARC MONTAGNON

JEAN-MARIE DUTHILLEUL A PARTICIPÉ À LA CONSULTATION DU GRAND PARI(S) AVEC JEAN NOUVEL ET MICHEL CANTAL-DUPART AVANT DE CRÉER EN JANVIER 2012 SA PROPRE STRUCTURE. SES PROJETS ET SES RÉALISATIONS ASSOCIENT CONSTRUCTIONS NEUVES ET RESTRUCTURATIONS. A L'ÉTRANGER, IL A CONÇU NOTAMMENT LES GARES DE SÉOUL EN CORÉE, DE TURIN EN ITALIE, DE SHANGHAI ET DE WUHAN EN CHINE AINSI QUE LE MUSÉE HISTORIQUE DE PÉKIN. IL INTERVIENT AUSSI RÉGULIÈREMENT DANS DES ÉDIFICES RELIGIEUX : ON LUI DOIT PAR EXEMPLE LA CONSTRUCTION DE L'ÉGLISE SAINT-FRANÇOIS-DE-MOLITOR À PARIS. IL EST DONC TOUT PARTICULIÈREMENT DÉSIGNÉ POUR APPORTER SA CONTRIBUTION À CE NUMÉRO « PATRIMOINE ET RÉHABILITATION ».

Comment l'architecture peut-elle prendre à bras le corps l'histoire et la continuer pour la mettre au service d'une perpétuelle refondation ?

Lorsque nous intervenons dans un site, nous en faisons d'abord une étude historique détaillée afin de concevoir notre intervention en pleine conscience de l'histoire qu'elle prolonge.

C'est un principe que nous avons développé chez AREP et que nous continuons à l'Agence Duthilleul.

Ainsi, lorsqu'il a fallu continuer la gare de Strasbourg pour notre siècle, nous étions confrontés à une double problématique : il s'agissait à la fois d'agrandir la gare et d'organiser enfin le passage confortable de tous les transports de la ville au train.

© MICHEL DENANCÉ

2



© D.BOY DE LA TOUR

3



Or la gare de Strasbourg et sa place jardin, construites en 1875 dans ce que l'on appelle « la ville allemande », avaient subi au cours du 20^e siècle toutes sortes de transformations mutilantes sous l'effet de l'irruption dans la ville des transports mécaniques : parkings, gare routière, voie express avec passage souterrain pour les piétons, place uniquement piétonne avec l'arrivée du tramway s'étaient succédés, appauvrissant toujours plus l'environnement de la gare.

Notre réflexion, dans le cadre de l'arrivée du TGV, a consisté à organiser la convergence sereine de l'ensemble des modes de transports, tout en rétablissant une vraie place jardin - plus de 150 hêtres ont été plantés - et en rénovant le bâtiment historique que l'on a placé dans un écrin de verre bioclimatique de façon à organiser le confort de passage entre les transports urbains et les trains.

Dans un tout autre domaine architectural et fonctionnel, votre démarche à l'Institut catholique de Paris s'inscrit-elle aussi dans ce même principe ?

Nous étudions actuellement la restructuration de l'Institut catholique de Paris, au croisement de la rue d'Assas et de la rue de Vaugirard, un campus constitué de bâtiments érigés entre le 17^e et le 20^e siècle sur lesquels nous intervenons à la fois en restaurant le patrimoine et en l'adaptant de telle manière qu'une université du 21^e siècle puisse y exercer ses compétences avec les exigences et les moyens d'aujourd'hui. Rien ou presque de cet ensemble architectural n'est visible de l'extérieur alors que la façade dissimule un campus de plusieurs hectares avec un jardin central préservé depuis le 17^e siècle.

C'est un ensemble historique car il intègre l'ancien Couvent des Carmes, dont l'église Saint-Joseph, qui comporte le premier dôme construit à Paris

sur le modèle des dômes florentins, commandé à des charpentiers français par Marie de Médicis⁽¹⁾. Il importait de le mettre en valeur. Ce sera en quelque sorte l'élément d'architecture « iconique » de cette université.

Ce projet constitue une illustration concrète des modes d'intervention de notre agence, qui s'inscrit d'ailleurs dans la continuité de ceux que nous défendions chez AREP avec Etienne Tricaud.

Nous promovons des démarches particulières de conception qui se démarquent des démarches linéaires que l'on a pu observer à la fin du 20^e siècle en maîtrise d'ouvrage publique, où s'enchaînent invariablement un pro-

gramme, puis une esquisse, puis un avant-projet et ainsi de suite. Nous pratiquons pour ces projets complexes en site historique des démarches itératives entre l'analyse du patrimoine, ses capacités, ses atouts, ses richesses et une programmation. Il y a ainsi une adaptation du programme au projet aussi bien que du projet au programme.

Nous avons appréhendé de la même manière toutes les grandes gares historiques que nous avons rénovées, en particulier, la gare de l'Est et la gare Saint-Lazare.

La gare de l'Est est un ouvrage étonnant dont la partie la plus ancienne date de Napoléon III et qui a été agrandi en 1930, presque à l'identique. Entre les deux halls - l'ancien et le nouveau - se situait un espace pour les bagages, couvert d'une voûte en pavés de verre qui avait été étanchée avec du bitume au milieu du 20^e siècle.

Sur cette gare, comme sur toutes celles sur lesquelles nous sommes intervenus, nous avons réorganisé les accès en totalité notamment ceux venant du métro pour les recomposer en cohérence avec la géométrie de la gare, puis, dans ce cas précis, dégagé la voûte en pavés de verre, utilisé l'ensemble des volumes et remis en valeur l'architecture pour les voyageurs qui y passent tous les jours.

La gare de l'Est est un bon exemple de la façon dont on peut s'emparer d'un bâtiment historique pour le remettre en valeur tout en améliorant son fonctionnement.

Une démarche identique a été développée pour la gare Saint-Lazare, conçue par Just Lisch pour l'exposition universelle de 1889. Au cours du 20^e siècle, cette gare a vu se brancher littéralement sur elle l'ensemble des stations de métro qui la desservent, sans qu'ait été mise en place une composition logique des accès organisée en fonction de l'architecture de Just Lisch. Il s'agissait donc d'utiliser

et d'amplifier la composition d'origine afin que la gare puisse absorber dans de bonnes conditions les 500 000 personnes qui la fréquentent quotidiennement, alors que l'architecte avait conçu l'édifice pour des gens qui arrivaient à la gare en calèche. Nous avons donc recomposé cet ensemble devenu disparate en faisant en sorte que les métros convergent vers un niveau -1 que nous avons créé sous la galerie des pas perdus, avec une organisation très lisible tout en faisant en sorte que la lumière naturelle descende jusque dans les profondeurs.

D'autres exemples d'intervention avec le souci de continuité historique ?

Dans le Jardin des Plantes, la Cité des Chercheurs, rue Buffon, qui abrite les chercheurs en sciences naturelles et les collections depuis le 19^e siècle, constitue un ensemble architectural vieillissant mais sublime au milieu de jardins étonnants qui demande à être agrandi et modernisé, aussi bien pour la conservation des collections que pour le travail des chercheurs. Pour ce projet, nous avons remporté une consultation avec le parti pris de préserver les bâtiments existants et de les compléter tout en gardant les jardins de façon à perpétuer l'histoire d'un site qui raconte, depuis le 19^e siècle, toute l'histoire de la recherche française dans les sciences naturelles.

Outre Notre-Dame de Paris et Notre-Dame de Strasbourg, sur lesquelles votre agence est intervenue, les travaux entrepris sur la cathédrale de Nanterre ont contribué à mettre en lumière un édifice dont la richesse architecturale était totalement méconnue.

Dans le cas de la cathédrale Sainte-Geneviève de Nanterre, comme pour toutes les interventions dans des édifices religieux, il s'agissait d'organiser

1- Jean-Marie Duthilleul, architecte et ingénieur.

2- Le pôle d'échange multimodal de Strasbourg (architectes : JM. Duthilleul, F. Bonnefille, E. Tricaud).

3- Gare de Strasbourg : le bâtiment historique est dans un écrin de verre bioclimatique (architectes : JM. Duthilleul, F. Bonnefille, E. Tricaud).

4- La cathédrale Sainte-Geneviève de Nanterre : vue aérienne du chœur et du transept (architectes : JM. Duthilleul, B. Ferré).

5- L'extension sud de la restructuration des anciens ateliers de l'usine Panhard, Paris Porte d'Ivry (architectes : JM. Duthilleul, E. Tricaud, B. Ferré, S. Caillaud).

© MATHIEU LEE VIGNEAU



© MATHIEU LEE VIGNEAU



l'espace pour permettre la célébration du culte selon les orientations liturgiques du concile Vatican II tout en permettant au propriétaire, en l'occurrence la commune de Nanterre, de satisfaire ses objectifs de conservation et de mise en valeur du patrimoine.

La cathédrale de Nanterre est un bâtiment inachevé des années 30 - dont la construction a été interrompue par la guerre - de type néo-roman en béton armé couvert du plus grand ensemble de fresques de l'époque en France, réalisé entre 1926 et 1937 sous la direction du maître Paul Baudoûin.

Nous étions donc dans un contexte aussi bien culturel que religieux, et les travaux ont été cofinancés par la commune de Nanterre, le diocèse de Nanterre et le conseil général des Hauts-de-Seine aidés de généreux mécènes. Notre intervention a été très complète avec un nettoyage de l'ensemble des fresques et une création intégrale de tout le mobilier qui est désormais installé dans cette cathédrale. L'édifice aujourd'hui est devenu un lieu de visite pour tout le département des Hauts-de-Seine.

Il en a été de même pour l'église Saint-Germain-des-Prés, édifice parisien mondialement connu dont nous avons réaménagé les espaces liturgiques et où la Ville de Paris et la paroisse ont unis leurs efforts pour lancer les travaux de nettoyage de l'ensemble de l'édifice qui vont s'étaler sur cinq ans.

L'agence Duthilleul et AREP, ainsi que Gares & Connexions (filiale de la SNCF) sont installées dans l'ancienne usine Panhard & Levassor, avenue d'Ivry à Paris. Comment avez-vous été amenés à vous y installer ?

Lorsque les halles que louait AREP dans le quartier des Batignolles ont été vendues, nous avons cherché des locaux et nous avons trouvé, sur une indication des services de la ville de Paris, cette usine qui avait fermé au

JEAN-MARIE DUTHILLEUL : L'ARCHITECTURE AU SERVICE DE L'HOMME

Jean-Marie Duthilleul est architecte (École de Paris La Seine) et ingénieur (École Polytechnique et École Nationale des Ponts et Chaussées).

En 1977, il s'investit sur le sujet de la ville en intégrant l'équipe du secrétariat des villes nouvelles qui anime des réflexions urbaines notamment sur la centralité, la mixité, la densité et, déjà, la maîtrise de l'énergie dans la cité.

En 1982, il est chargé de mission pour l'Exposition universelle puis en 1983 intègre l'équipe chargée de lancer les grands projets de l'État à Paris.

En 1986, les dirigeants de la SNCF l'appellent pour structurer un atelier d'architecture. Avec Étienne Tricaud, il conçoit et réalise des projets de gare autour des développements du réseau TGV. Ces projets renouvellent les bases théoriques de la conception des grandes gares contemporaines qu'il perçoit comme des territoires nécessitant à la fois une approche urbaine et une approche d'architecture : ouverture sur la ville, intermodalité, gestion des flux, lisibilité, développement des commerces et services.

En 1997, lauréat du concours international pour la gare TGV de Séoul, il crée, avec Étienne Tricaud, dans le groupe SNCF, l'agence AREP, équipe pluridisciplinaire qui s'investit dans la création de nombreuses gares et de l'aménagement urbain qui en découle tant en France qu'à l'étranger, et développe des études urbaines à grande échelle.

Jean-Marie Duthilleul a participé à la consultation du Grand Pari(s) dans l'équipe réunie autour de Jean Nouvel. Il a par ailleurs présidé de 2010 à 2012 le comité d'orientation du Plan Campus lancé par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et a créé en janvier 2012 sa propre structure.

début de ce siècle et que le propriétaire, Remy Gaston Dreyfus, cherchait à remettre en valeur.

Nous nous sommes vraiment « coulés » dans l'édifice en gardant les volumes existants et en réalisant deux extensions. Nous avons réussi, dans un bâtiment de 50 m d'épaisseur, à faire 7 000 m² de bureaux, ainsi qu'une crèche et le siège de l'association « La Mie de Pain », qui date d'ailleurs de l'époque des usines et qui s'occupe des sans abri.

Le bâtiment existant a été agrandi et surélevé. La construction de deux grands containers à l'écriture industrielle et sculpturale au nord et au sud, enchâssent les façades historiques

ordonnées et les magnifie. Cela s'est passé à l'époque où nous travaillions sur le Grand Paris et où nous avons découvert la richesse de tout ce territoire en bâtiments industriels. On peut déplorer que ces bâtiments industriels soient souvent rasés pour laisser place à des constructions nouvelles faisant fi de la mémoire des lieux qui est pourtant l'un des ingrédients de la ville. Nous pensons qu'autour de Paris il existe des centaines de bâtiments industriels qui devraient non pas être démolis mais transformés. L'architecture industrielle n'est pas encore reconnue comme elle le mérite. Alors que la rénovation et la réutilisation de ces bâtiments amène à des compo-

sitions étonnantes et présente deux avantages : prolonger le passé du lieu et donc inscrire l'intervention dans l'histoire ce qui est quand même la moindre des choses pour une époque qui se pique de développement durable, et en même temps créer des espaces dotés d'une identité propre et dans lesquels les gens aiment venir travailler parce qu'ils sont à chaque fois uniques en leur genre. À côté de quelques réhabilitations emblématiques, une grande partie du patrimoine industriel est, malheureusement et souvent, soit abandonnée, soit démolie. Sans parler du patrimoine des années 50 et 60 qui est fortement menacé aujourd'hui. Les immeubles en pierre massive de cette époque subissent l'assaut des idéologues de l'isolation par l'extérieur qui détériorent définitivement ces constructions en pierre en chevillant sur leurs parois toutes sortes de matériaux isolant plus ou moins durables qui les empêchent de respirer et provoqueront à brève échéance leur dégradation. Ces architectures de pierre du 20^e siècle risquent d'être massacrées dans les dix ans qui viennent s'il n'y a pas des réactions un peu fortes pour que soient mises en œuvre des solutions techniques aux problématiques thermiques respectueuses du patrimoine en cause.

Dans le cadre de l'appel d'offre lancé par la Société du Grand Paris, vous avez gagné la réalisation de quatre gares : Pont-de-Sèvres, Noisy-Champs, Sevran-Livry et Sevran-Beaudottes. Quel est votre projet pour ces ouvrages ?

Ces gares vont constituer un ensemble d'architectures sous le sol naturel puisque le métro est entièrement souterrain.

En quelques années, vont être livrés une trentaine de « morceaux » d'architecture souterraine, ce qui n'a jamais été fait en si peu de temps depuis la création du métro parisien.

© AGENCE DUTHILLEUL

6



© S. LUCAS

7



Le projet intervient à un moment où l'on vit l'espace de façon radicalement nouvelle, de façon subjective : dans ces espaces les gens ne cherchent plus à se faire une représentation globale de l'espace comme il y a seulement 20 ans mais veulent simplement voir de l'endroit où ils sont l'endroit où ils vont. C'est l'histoire du type dans une gare qui regarde un plan où il est écrit : « vous êtes ici » et qui répond : « c'est pas moi que je cherche, c'est mon train » ! Cette vision subjective de l'espace, amène à penser celui-ci de façon beaucoup plus continue de la ville au métro, d'où l'importance de faire descendre la lumière naturelle partout dans les stations.

Bien que les gares soient souterraines ?

Bien sûr, tout est affaire de matière, de formes, de couleurs. Toute architecture est une caisse de résonance pour la lumière. Il s'agit donc de l'organiser pour cela même sur une hauteur de 25 mètres. C'est bien ce que nous projetons pour la gare nouvelle de la porte Maillot sur le prolongement du RER E vers l'ouest.

Actuellement, l'un des grands aménagements en cours à Paris se situe dans le 13^e arrondissement, autour de la gare d'Austerlitz. Dans quel esprit cette réorganisation est-elle menée ?

Nous travaillons effectivement avec Jean Nouvel sur la structuration complète du quartier autour de cette gare. La gare d'Austerlitz n'avait jamais généré de quartier autour d'elle puisqu'elle était coincée entre la Seine, le jardin des Plantes et l'hôpital de la Salpêtrière.

Le projet a suscité une réflexion de la Ville de Paris et de SNCF sous l'égide de l'aménageur SEMAPA, afin que SNCF compacte ses installations au sud de la gare et permette l'installation

de logements, de bureaux et de commerces entre la gare et l'hôpital. Il en découle trois conséquences.

La première c'est la remise en valeur de la grande façade de l'hôpital de la Salpêtrière, due à l'architecte Libéral Bruant comme l'hôpital des Invalides, avec la mise en place d'un vrai jardin entre cette façade et le métro. La deuxième est la rénovation-restructuration de la gare proprement dite et, notamment, de sa grande halle, actuellement occupée par un parking. Cette halle de 250 m de long sur 50 m de large fut à l'époque un grand ouvrage de fonte réalisé par Pont-à-Mousson, tellement renommé que la gare de Valparaiso, au Chili, en est une copie conforme et a même été

construite avec des pièces issues des mêmes moules que ceux de la gare d'Austerlitz. Cette halle va redevenir le cœur vivant de la gare. Enfin, les espaces latéraux à la gare au nord et au sud seront réaménagés et la cour, aujourd'hui illisible qui fait office de parkings pour les taxis, donnera directement sur la grande galerie du Jardin des Plantes.

Et à l'étranger, comment travaillez-vous ?

Nous avons beaucoup travaillé en Chine. Nous y sommes arrivés en gagnant en 2000 quatre concours : la gare de Shanghai Sud, le quartier d'affaires de Xizhimen à Pékin, le musée de Pékin et le Data Center de la banque d'Agriculture de Chine.

Ce qui nous a intéressés dans ces projets était de concevoir une architecture contemporaine mais qui enrichisse également la culture millénaire de la Chine.

Et nous, architectes occidentaux nourris par les exemples d'architecture chinoise et japonaise qui ont été de grandes références du mouvement moderne dans les années trente, lorsque nous répondons à ces sujets, nous sommes selon leur dire « plus Chinois que les Chinois ». Notre démarche, que ce soit en France ou dans les pays où nous sommes intervenus, est de savoir comment continuer la culture du pays en question. Par exemple, la gare de Turin est une galerie turinoise bien avant d'être une gare ferroviaire.

Notre travail est un travail sur la culture. C'est le même principe qui nous a guidés à Valence, Aix et Avignon.

Tout le monde connaît vos gares que nous apprécions pour leurs qualités fonctionnelles et plastiques. Mais justement comment avez-vous pu concevoir en même temps trois gares aussi différentes que celles d'Aix-en-Provence TGV, Valence TGV et Avignon TGV ?

Tout simplement parce qu'elles continuaient l'histoire de trois sites complètement différents.

À chaque fois que l'on intervient sur un site on le transforme forcément. Souvent on entend parler d'« intégration » dans un paysage comme s'il s'agissait d'y disparaître, que la construction projetée ne se voie pas. Mais ça n'existe pas : toute architecture modifie le paysage, la ville, les bâtiments.

Cette dimension du projet ne peut être niée et doit être assumée.

Alors, la seule issue est d'aimer les lieux que l'on va transformer, et pour cela les connaître, on y revient toujours. Puis de procéder par enrichissement, ce qui nécessite forcément beaucoup d'écoute, d'attention, de discussions avant d'aboutir au projet juste.

À Aix-en-Provence TGV, il nous fallait concevoir un espace susceptible d'accompagner les voyageurs à leur descente de train, face à la Montagne Sainte-Victoire, la sublime montagne célébrée par Cézanne, symbole du pays d'Aix.

À Valence nous étions face au Vercors, grande barre rocheuse apparaissant à contre-jour au sud.

À Avignon, la gare devait se poser au bord de la Durance et se glisser entre les haies de cyprès qui abritent du mistral avec la vue sur le Palais des Papes au loin. Comment dans ces conditions ne pas composer des gares si différentes ?

La grandeur de l'architecture c'est bien d'être une réponse à la nécessité absolue pour nous tous de continuer à inventer la configuration de l'espace où nous vivons, pour l'humanité d'aujourd'hui et pour celle du futur. □

6- Prolongement du RER E à l'ouest : perspective d'étude, vue depuis les quais, la gare souterraine de Porte Maillot (Agence Duthilleul - AREP/illustrateur : Studio Grenade).

7- Gare d'Aix-en-Provence TGV : vue sur la façade ouest et l'accès routier (architectes : JM. Duthilleul, F. Bonnefille, E. Tricaud).

8- Vue extérieure du Musée historique de la Ville de Pékin (architectes : JM. Duthilleul, E. Tricaud).

9- Gare de Wuhan, en Chine : une architecture contemporaine enrichie par la culture millénaire de la Chine (architectes : JM. Duthilleul, E. Tricaud).

© ANDREW YU



© T. CHAPUIS





1
© PEUTZ

PEUTZ APPRIVOISER LE SON, DOMESTIQUER LE VENT

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

PEUTZ & ASSOCIÉS FRANCE EST UNE SOCIÉTÉ D'INGÉNIEURS-CONSEILS EN ACOUSTIQUE ET PHYSIQUE DU BÂTIMENT QUI A DÉBUTÉ SON ACTIVITÉ IL Y A PLUS DE 37 ANS ET DONT LA MAISON MÈRE A ÉTÉ CRÉÉE AUX PAYS-BAS AU DÉBUT DES ANNÉES 60. L'ANTENNE FRANÇAISE, DIRIGÉE PAR STÉPHANE MERCIER, EMPLOIE 20 PERSONNES. ELLE EST ÉTABLIE À PARIS ET À LYON. SES ACTIVITÉS DANS LE DOMAINE DE L'ACOUSTIQUE DU BÂTIMENT SONT EXTRÊMEMENT DIVERSIFIÉES : CENTRES NAUTIQUES, CENTRES CULTURELS, CINÉMAS ET THÉÂTRES, ZÉNITHS, MUSÉES, MÉDIATHÈQUES, STADES ET SALLES DE SPORTS, SALLES MULTIFONCTIONS DE GRANDE CAPACITÉ... AUXQUELS S'AJOUTE LA GESTION DE L'ACOUSTIQUE DANS LES GARES, LES AÉROPORTS ET LES LIEUX PUBLICS, AINSI QUE CELLE DES VIBRATIONS DANS TOUS TYPES DE BÂTIMENTS.

Tout a commencé en 1954 à l'initiative de Victor Peutz, un physicien néerlandais, qui a d'ailleurs fait une partie de ses études à La Sorbonne, à Paris, et qui s'intéressait beaucoup aux problèmes

de la perception sonore. Il était, par ailleurs, mélomane averti. Victor Peutz s'aperçoit qu'il existe très peu de données sur les matériaux acoustiques hormis celles fournies par les laboratoires de recherche

1- La Géode à Paris : cette grande boule ronde constitue le défi absolu pour un acousticien.

universitaires ou militaires : les données publiques sont quasiment inexistantes. Ce qui l'amène à créer aux Pays-Bas un laboratoire indépendant, qui n'est pas affilié à une industrie - l'un des tout



© PEUTZ
2



© PEUTZ
3



4

PATHÉ WEPLER 3D : UN RÉSULTAT STUPÉFIANT

« La notion d'intelligibilité se réfère la capacité de comprendre sans altération le message qui a été émis par l'orateur ou la sonorisation, indique Stéphane Mercier. Avec l'avènement des films en images 3D, les bandes-son ont également été enregistrées et traitées sans faire coïncider l'origine des sons avec la position 3D des objets ».

« À Paris, la nouvelle salle 3D du cinéma Pathé Wepler, par exemple, constitue un exemple directement perceptible du travail que nous pouvons proposer pour parvenir à la meilleure restitution spatiale possible du son : elle recrée au niveau des oreilles des spectateurs une parfaite similitude dans l'espace entre l'image d'un objet, par exemple, et le son qui lui correspond lorsqu'on le déplace ou le manipule : le son se situe au niveau de l'objet. Ce résultat est obtenu à l'aide d'une salle à l'acoustique particulièrement ajustée et d'une batterie de 68 haut-parleurs disposés judicieusement dans la salle. Lorsque le film projeté est réalisé selon les règles de l'art de la 3D, c'est vraiment bluffant ».

En France, Peutz a également travaillé sur nombre de réhabilitations ou reconstructions tel l'Olympia dont la salle a été déplacée d'une centaine de mètres.

« Cela a été un sérieux défi pour nous, poursuit-il. Nous avons caractérisé la salle et le maître d'ouvrage nous a demandé de la concevoir, au niveau du son, à l'identique. La difficulté venait essentiellement du fait que nous n'étions pas entièrement satisfaits des caractéristiques acoustiques d'origine. Nous les avons simplement légèrement améliorées sans en dénaturer ce qui en faisait la spécificité. Mais le défi acoustique le plus important était d'annihiler, tant au niveau des vibrations que du bruit, le passage, directement sous la nouvelle salle, de trois lignes de métro : dans la pratique, la "boîte" qui constitue la salle est placée sur une forêt de ressorts qui filtrent les vibrations provenant du passage des métros. Un chantier titanesque ».

Cette même technique a été utilisée récemment pour la nouvelle salle des « Trois Baudets » à Paris.

L'installation sonore des salles de concerts et de spectacles, notamment des Zéniths constitue l'un des axes de développement de Peutz puisque l'entreprise en a installé plus de 70%, à commencer par le premier, celui de Paris, dans une zone particulièrement

premiers en Europe - pour mesurer les propriétés des matériaux.

Il étend rapidement sa démarche expérimentale au niveau de l'acoustique aux problèmes thermiques et à ceux du vent - phénomène important dans son pays d'origine - ce qui le conduit à acquérir une soufflerie aérodynamique pour répondre à l'impossibilité d'une prédiction fiable pour des calculs dans ce domaine à cette époque. C'était il y a plus de 30 ans.

Peutz s'intéresse au « confort » en général et aborde ainsi peu à peu d'autres secteurs tels que celui de la lumière, des parois froides, de l'étanchéité à l'air et des effets du soleil sur les bâtiments.

C'est dans cette culture de « laboratoire » et de connaissance des matériaux par l'expérimentation que réside le savoir-faire de l'entreprise, son cœur de métier.

L'intérêt de Victor Peutz, mélomane averti rappelons-le, donc sensible aux phénomènes liés à l'ouïe, l'amène à proposer la première méthode de mesure et de prédiction de l'intelligibilité d'un message parlé.

Il est à l'origine de la définition du critère d'intelligibilité ALCons (Articulated Loss of Consonants : perte d'articulation des consonnes).

Cet indice permet de caractériser la compréhension d'un message parlé diffusé par une installation de sonori-

2- La salle de la Géode, circulaire comme l'écran qui lui fait face.

3- La grande dune de verre du Musée des Arts de l'Islam.

4- L'intérieur du Musée des Arts de l'Islam, l'un des rares endroits dans le musée du Louvre où l'ambiance est calme.

5- Stéphane Mercier, directeur de Peutz & associés France.

sation dans une salle et sert toujours de référence en acoustique des salles. Aujourd'hui, le groupe possède trois laboratoires de mesures agréés :

- Acoustique (mesures de l'absorption et de l'isolement d'éléments de construction, mesure de puissance acoustique...),
- Physique du design urbain (soufflerie, ensoleillement...),
- Physique du bâtiment (confort thermique et hygrométrie).

Il emploie plus de 150 personnes en Europe dans 5 pays (France, Pays-Bas, Allemagne, Belgique et Italie).

© MARC MONTAGNON



5



6

© PEUTZ

broyante en bordure du périphérique Nord, mais aussi, pour en citer quelques uns parmi les plus emblématiques au niveau architectural, ceux d'Orléans, de Montpellier, Nantes et Saint-Étienne.

OPÉRAS, THÉÂTRES : GÉRER LE SON

Dans un domaine similaire, c'est également à Peutz que l'on doit la réalisation de l'équipement acoustique du nouvel opéra de Lyon (architecte Jean Nouvel), dont on a gardé la façade historique, de l'opéra rénové de Lille (architectes Neyrinck et Carlier), des centres de congrès de Tours (architecte Jean Nouvel) et de Bordeaux (architecte Jean-Michel Wilmotte) ainsi que de la « Salle 3000 » de Lyon (architecte Renzo Piano), sans oublier la rénovation récente de l'emblématique Maison de la Mutualité à Paris (architecte Jean-Michel Wilmotte).

Pour en terminer avec ces quelques exemples révélateurs de la compétence de Peutz en matière d'acoustique, il faut évidemment citer, bien que sa réalisation soit déjà ancienne, la Géode à Paris, cette grande boule ronde qui constitue le défi absolu pour un acousticien.

MATÉRIAUX : PAS DE DISCRIMINATION

La culture de laboratoire de l'entreprise l'amène à penser qu'il est possible d'utiliser des matériaux de tous types pour une même fonction : béton, verre, acier, bois...

La bourse d'Amsterdam, considérée comme la plus ancienne au monde, établie il y a quatre siècles (1602), est abritée aujourd'hui dans l'un des grands monuments de l'architecture néerlandaise du 20^e siècle.

Le bâtiment historique en briques de 1893 a été conservé et fait office de musée mais il contient, en plus, le siège de l'orchestre philharmonique néerlandais.

Dans cet édifice, Peutz a conçu une salle de concert, constituée d'une « boîte » entièrement en verre posée dans l'espace principal de l'édifice. En revanche, le bois et le plexiglas habillent l'ensemble du nouveau « Muziekgebouw » d'Amsterdam tandis que ce sont une seconde peau intérieure en métal déployé et une canopée⁽¹⁾ au dessus de la fosse d'orchestre qui restituent les sons dans la coupole de la « Tonhalle » de Düsseldorf dont l'acoustique était catastrophique

6- Le stade des Alpes à Grenoble : une sonorisation qui ne perturbe pas le voisinage.

7- Le tunnel de la Croix Rousse à Lyon : un système de sécurité intelligible.

8- Le Zénith de Saint-Étienne avec sa grande « casquette » caractéristique.

9- L'aménagement intérieur du Zénith de Saint-Étienne : confort à tous les niveaux pour les spectateurs.

avant l'intervention de l'acousticien. À Grenoble, la grande salle de la Maison de la Culture a fait l'objet, avec le concours de Peutz, d'une rénovation mélangeant bois et béton, spectaculaire au niveau sonore. Mais l'une des réalisations récentes dont l'entreprise est fière, c'est la nouvelle salle de concert de Bondy, spécialement dédiée à la voix (nouveau site de la Maîtrise de Radio-France), construite entièrement en béton apparent.

Toujours dans le domaine du traitement du son, son activité couvre également les piscines et les centres aquatiques, avec plus de cinquante références et aussi de nombreux stades, salles de sports et gymnases.



7

© PEUTZ



8



9

© PEUTZ



Parmi les derniers en date, le complexe sportif Jules Ladoumègue à Paris en bordure du périphérique parisien à la porte de Pantin, livré en janvier 2014, constitue une application intéressante d'un matériau contemporain puisqu'il s'agit d'une « boîte » en plexiglas abritant notamment six terrains de tennis et créant un écran visuel et acoustique pour les autres activités.

MUSÉE DU LOUVRE : LE SILENCE DU DÉSERT

Peutz vient également de participer à l'élaboration du projet de Musée des Arts de l'Islam dans le Musée du Louvre, avec une grande dune de verre, éclairée la nuit, symbolisant

10- Maquette du Pôle aquatique de Mantes-la-Jolie et de sa piscine Aqualude, la plus grande des Yvelines.

11- Le « Vendéspace », complexe sportif et culturel de Mouilleron-le-Captif, au nord de la Roche-sur-Yon, en Vendée.

12- Effets de couleurs dans l'une des salles du Vendéspace.

la destination du lieu (architectes Bellini & Ricciotti).

« *C'est l'un des rares endroits dans le musée où l'ambiance est calme, relève Stéphane Mercier* ».

Un autre projet tout aussi remarquable sur lequel Peutz dispose d'une mission complète est celui du Centre culturel du Vin à Bordeaux, sous maîtrise d'ouvrage de la Mairie de Bordeaux. L'ouvrage est appelé à constituer une vitrine du vin avec des éclairages et une acoustique particulièrement sophistiqués.

DE L'ACOUSTIQUE AUX ÉQUIPEMENTS TECHNIQUES

Peutz est un bureau d'études dont la spécialité première est l'acoustique

sous toutes ses formes. Son expertise s'applique aussi bien dans une salle où la propagation du son est importante que dans une école où il faut insonoriser les classes entre elles et les protéger des bruits de la rue.

Son métier est aussi la maîtrise du bruit des équipements techniques qui peut constituer une nuisance à l'intérieur ou à l'extérieur d'un bâtiment.

Il s'agit là d'un sujet d'une réelle actualité dans une période où l'on procède massivement à des rénovations de bâtiments et où l'on installe dans des lieux autrefois silencieux des équipements en toiture, en terrasse ou en cour intérieure qui sont générateurs de pollution sonore, dans ►



© PEUTZ



© PEUTZ



les centres urbains et tout particulièrement à Paris. Au-delà de la seule question de l'acoustique, Peutz se préoccupe des vibrations engendrées par ces nouveaux équipements et transmises par les structures.

L'objectif est d'en minimiser voire d'en annuler l'impact.

Par exemple, des studios de télévision viennent d'être construits à la Plaine-Saint-Denis en bordure du faisceau de voies ferrées de la gare du Nord : les nouvelles structures construites ont été placées sur des appuis isolants afin de les isoler complètement, selon la technique décrite plus haut pour l'Olympia qu'il convenait d'isoler des bruits et des vibrations provoquées par le métro.

Un autre domaine d'intervention, toujours lié à l'intelligibilité du son, est celui de l'électro-acoustique : « *Nous sommes capables dans un stade comme celui de Grenoble, précise Stéphane Mercier, d'installer des haut-parleurs qui soient intelligibles tribunes pleines, tribunes vides ou tribunes à moitié pleines sans perturber le voisinage qui n'a aucun intérêt à entendre la sonorisation du stade, pas plus que les réactions, voire les cris, des spectateurs* ».

Peutz a également travaillé, dans le tunnel de la Croix Rousse, à Lyon, sur l'intelligibilité du système de sécurité en cas d'incendie ou d'accident dans l'ouvrage.

Depuis quelques mois, l'entreprise s'est associée à un studio spécialisé dans les concepts d'éclairage - naturel ou artificiel - dont l'une des réalisations prestigieuses est la mise en lumière de la voûte de la Galerie des Glaces du Château de Versailles.

Cette intervention exige la mise en valeur des œuvres et le respect des artistes par la discrétion des luminaires. De nombreux bâtiments requièrent ce niveau d'exigence.



© PEUTZ

13

DOCKS VAUBAN AU HAVRE : MAÎTRISER LE VENT

Le centre commercial et de loisirs Docks Vauban sur le port du Havre est installé dans d'anciens docks-entrepôts construits au 19^e siècle. Les bâtiments ont été réhabilités et transformés par l'architecte Bernard Reichen mais ils ont posé, dès l'ouverture, des problèmes de climat éolien car les trois rues parallèles qui les constituent sont orientées longitudinalement dans le sens des vents dominants et leur couverture n'est que partielle. Les vents étaient fréquents et provoquaient un effet venturi dans les entrées et sorties du centre ainsi que, ponctuellement, à certains endroits. Peutz a été mandaté pour apporter une solution à cette situation qui affectait les visiteurs. L'objectif était d'atténuer, voire de supprimer les risques d'apparition de ces phénomènes inconfortables.

En raison de la complexité du projet, Peutz a simulé en soufflerie le port du Havre et la zone des docks dans laquelle est implanté le centre sur une maquette installée sur une table tournante afin de mesurer les vitesses et les directions de vent atteignant les Docks Vauban.

À la suite de ces mesures, des dispositifs ont été mis en place aux endroits les plus exposés, non pas pour lutter contre le vent en l'arrêtant, mais en le freinant et en le dirigeant. Il s'agit principalement d'écrans dont la porosité est maîtrisée afin de ne pas créer latéralement des effets de tourbillon. Les vents sont ainsi dirigés, poussés, freinés à tous les endroits sensibles mis en évidence par les tests sur la maquette.

LE VENT : UN CLIENT EXIGEANT

En ce qui concerne le vent, dont l'aspect le plus connu est l'effort qu'il exerce sur la structure d'un bâtiment,

l'entreprise étudie également ses effets dynamiques, c'est-à-dire les vibrations engendrées. C'est un phénomène que l'on rencontre de plus en plus souvent

13- Les « Docks Vauban », sur le port du Havre, posaient de sérieux problèmes de climat éolien.

14- Le bâtiment emblématique du « Palais de la Mutualité » à Paris.

15- Le nouvel aménagement intérieur du Palais de la Mutualité.

dans les constructions contemporaines car elles incorporent désormais fréquemment une seconde peau accrochée sur la première et qui peut, dans des conditions particulières de vent, entrer en vibration, voire provoquer des sifflements et transmettre des basses fréquences dans les locaux. « *Tous ces phénomènes, nous savons les mesurer, les évaluer et les corriger lorsqu'ils se produisent* ».

Dans un cadre plus large, Peutz est également en mesure de déterminer à l'avance, à l'échelle d'un quartier et même d'une ville, le climat éolien du site dans le cas, par exemple, de construction d'immeubles de grande hauteur proches les uns des autres. Ceci peut s'appliquer à des places publiques, des centres commerciaux semi-ouverts, des terrasses de restaurant, etc.

MONITORING DE CHANTIER : AU SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT

Le monitoring de chantier est entré, depuis une dizaine d'années, dans le champ d'activité de l'entreprise. Il concerne essentiellement, pendant le déroulement d'un chantier, la protection



© PEUTZ

14



© PEUTZ

15

16- Le Drugstore Publicis sur les Champs-Élysées avec la structure-sculpture en verre qui habille la façade.

17- La salle des machines du théâtre « La Piscine » de Chatenay-Malabry, dans les Hauts-de-Seine, aménagé dans une ancienne usine de traitement des ordures ménagères.

18- Effet de lumière dans « La Piscine » à Chatenay-Malabry.

© PEUTZ



16

DRUGSTORE PUBLICIS : MESURER LES EFFORTS VIBRATOIRES

À Paris, le drugstore Publicis a été habillé, lors de sa rénovation, d'une structure en verre - formant une véritable sculpture - qui se développe en façade. Cette structure constituée d'écaillés non solidaires les unes des autres se trouve dans l'axe principal des vents balayant l'avenue des Champs-Élysées. Préalablement à la construction, le BET façade s'est inquiété du risque de mise en vibration des panneaux de la sculpture. Il avait également besoin de connaître les niveaux prévisibles des efforts vibratoires dynamiques auxquels étaient soumises les attaches de la sculpture. Peutz a étudié le phénomène sur une maquette incluant l'environnement urbain - notamment l'Arc de Triomphe - mais surtout l'angle de la sculpture concernée par les vibrations. Un ensemble de capteurs de pression installés sur la maquette a permis de connaître les efforts absolus en fonction des puissances de vent et de mesurer les turbulences engendrées par la forme des différents éléments ainsi que les efforts vibratoires qu'un réflecteur risque de générer sur le réflecteur voisin et ainsi de suite. L'étude de Peutz a ainsi permis d'affiner le dimensionnement final de la sculpture.

de l'environnement et souvent des tiers proches du site. Dans cette application, l'intervention consiste à identifier puis mesurer au bon endroit, avec les bons critères, les effets éventuellement négatifs au moment où ils se manifestent et à proposer des solutions qui soient compatibles avec la poursuite des travaux : mesures d'état initial, d'état intermédiaire et d'état final.

Sur le chantier de réorganisation des espaces d'accueil, actuellement en cours de travaux au Musée du Louvre, par exemple, la problématique de chantier vise essentiellement à protéger les visiteurs et le personnel, car le musée reste en fonctionnement pendant les travaux.

Procédés de construction, horaires de travail, types d'engins, équipements de protection de certaines zones ont ainsi été pris en compte de façon à aboutir à une procédure d'exécution qui permette aux entreprises de travailler dans des

conditions correctes d'efficacité, tout en assurant une protection satisfaisante des visiteurs circulant dans le musée aux abords de la zone de travaux : des

capteurs ont ainsi été positionnés à des endroits stratégiques afin de permettre une réaction immédiate en cas de problème.

« Nous faisons la plupart du temps, de la prestation adaptée à l'instar de tous les acousticiens, poursuit Stéphane Mercier. Il n'y pas deux opérations similaires : notre savoir-faire, c'est de comprendre la nature des demandes, les besoins des uns et des autres, de les analyser et de proposer une solution qui soit en adéquation avec leurs souhaits. Nous travaillons beaucoup avec les entreprises mais aussi avec les concepteurs au moment de la définition d'un ouvrage et des techniques qui vont être mises en œuvre pour le réaliser ».

L'IRCAM : UNE ACOUSTIQUE VARIABLE AVANT L'HEURE

Peutz & associés Paris a été créée lors de la construction en 1977 de la salle expérimentale ESPRO (espace de projection) de l'IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique du Centre national d'art et de culture Georges Pompidou à Paris). En effet, le premier chantier confié en France à Peutz fut celui de l'IRCAM, fondé par Pierre Boulez en 1969.

Pierre Boulez souhaitait un espace à acoustique variable : l'ESPRO a été conçue de manière à pouvoir faire varier la durée de réverbération.

Pour cela, la volumétrie est variable (parois et plafond mobiles) et les parois sont composées de trièdres qui présentent des caractéristiques acoustiques différentes sur chacune de leurs faces : absorbantes, réfléchissantes ou diffusantes.

À la croisée du laboratoire et de l'université, de l'école d'art et de l'atelier de production, l'IRCAM est aujourd'hui le plus grand institut au monde de recherche publique dédiée à la musique et au son. Tout un symbole pour un acousticien tel que Victor Peutz ! □

⁽¹⁾ **Canopée** : le mot est une traduction de l'anglais canopy, lui-même emprunté au vocabulaire de l'ameublement : c'est le ciel de lit ou baldaquin.

© PEUTZ



17

© PEUTZ



18



© JEAN-CHRISTOPHE BALLOT/OPIC/BNF

REFONTE DU SITE HISTORIQUE DE LA BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DE FRANCE

REPORTAGE DE MONIQUE TRANCART

LA BIBLIOTHÈQUE NATIONALE (PARIS 2^e) EST EN PLEINE RESTRUCTURATION. LA MISE AUX NORMES ET LA MODERNISATION PRENNENT EN COMPTE LA BEAUTÉ DES LIEUX, LEUR INTÉRÊT PATRIMONIAL OU HISTORIQUE : SALLES DE LECTURE MONUMENTALES, GALERIES CLASSÉES, ETC. AU CHAPITRE DE LA SÉCURITÉ INCENDIE : LA TENUE AU FEU DES STRUCTURES MÉTALLIQUES. AUTRE CONTRAINTE : LE POIDS DES PLANCHERS ET DU STOCKAGE DES DOCUMENTS.

La Bibliothèque nationale, rue de Richelieu à Paris 2^e, n'a cédé que temporairement sa notoriété (figure 1) à la Bibliothèque François Mitterrand avec ses 4 tours en bord de Seine à Paris 13^e, ouverte en 1998. Dès 1999, la programmation de son réaménagement a commencé. Allégée des collections d'imprimés et de périodiques, elle redéploie celles qu'elle a conservées : documents arts et spectacles, cartes et plans, estampes et photographies, manuscrits, monnaies, médailles et antiques.

Elle va également accueillir la bibliothèque de l'Institut national d'histoire de l'art (Inha) dont le siège se trouve en face, rue Vivienne, ainsi que celle de l'École nationale des chartes qui vient s'installer au 65 rue de Richelieu⁽¹⁾.

Le site historique de ce qui est devenu la Bibliothèque nationale de France⁽²⁾ forme un quadrilatère entre les rues de Richelieu à l'ouest et Vivienne à l'est, la rue des Petits-Champs au sud, et la rue Colbert au nord (figure 2). Plus de 54 000 m² sont rénovés et mis aux normes. L'opération s'étale sur vingt

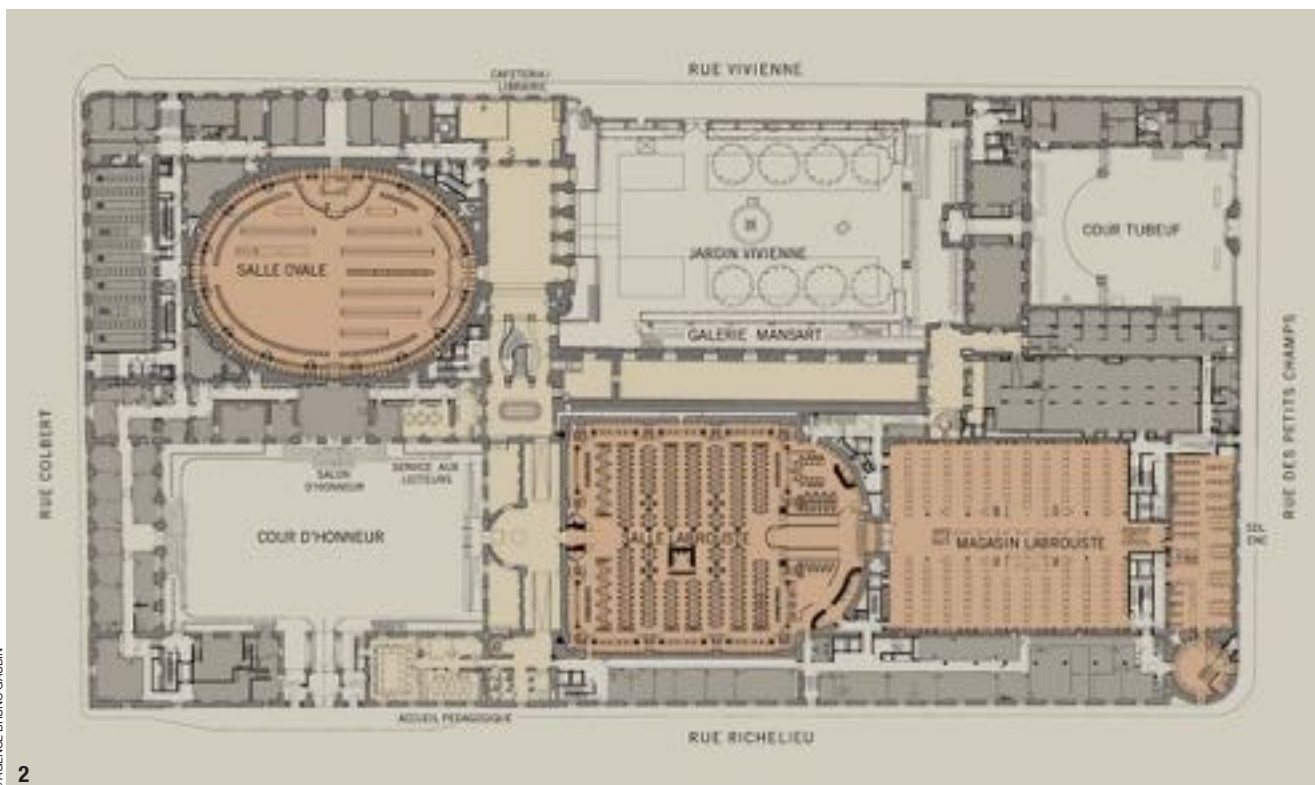
1- Entrée de la bibliothèque par la rue de Richelieu (Paris 2^e) et vue sur la cour d'honneur.

ans jusqu'à la réouverture complète prévue en 2019-2020. La maîtrise d'œuvre - Bruno Gaudin architecte mandataire - y travaille depuis 2007 avec l'architecte en chef des monuments historiques pour les parties

classées et Egis Bâtiments, bureau d'études techniques généraliste.

La bibliothèque restant ouverte pendant le chantier, la restructuration est scindée en deux, la première moitié le long de la rue de Richelieu, la seconde, côté rue Vivienne. Le programme vise à unifier l'ensemble appelé quadrilatère Richelieu.

Jusqu'à présent, les espaces créés en quatre siècles de fonctionnement communiquaient ici et là par une trentaine d'escaliers, certains très étroits. Ils n'étaient pas au même niveau,



un handicap pour organiser des circulations.

La Bibliothèque nationale veut élargir son public au-delà des chercheurs et amateurs qui viennent y consulter des documents rares. Les visiteurs pourront apercevoir les salles de lecture, les magasins de stockage et les belles salles. Ils traverseront la galerie Mazarine classée monument historique, au plafond peint par Romanelli en 1646 (figure 3), et où seront exposés des objets, trésors de la bibliothèque.

Elle se modernise en tant qu'outil de recherche : poursuite de l'informatisation des catalogues, dématérialisation des ouvrages, réservation, travail en groupe, etc.

STRUCTURES SUPERPOSÉES

Le quadrilatère aura deux entrées. Celle rue de Richelieu comporte une porte monumentale, flanquée dorénavant de deux portes latérales. Celle rue Vivienne se présente avec une grille sur cour. Ces deux accès seront reliés par l'intérieur.

Organiser une circulation dans cet ensemble de bâtiments dont les plus anciens remontent au XVII^e siècle et les plus récents datent du XX^e, est un défi. « *L'extérieur est assez homogène, l'intérieur est un vrai millefeuille*, souligne Bruno Gaudin, architecte. *Il a pu être modifié au fil du temps ou être resté à l'identique. Les étapes ultérieures sont imbriquées dans l'état d'origine.* » Par exemple, Michel Roux-Spitz, architecte, rajoute sept étages au magasin central entre-deux-guerres puis dans

les années 1950 (figure 4). Il fait passer la structure porteuse en acier à côté de celle de son prédécesseur, Henri Labrouste, qui avait fait construire quatre niveaux de magasin en 1864-1865 avant de s'attaquer à la salle de lecture de 18 m de haut qui porte son nom et dont la restauration est presque terminée. Le vestibule attenant à cette salle monumentale retrouve en partie sa décoration d'origine avec ses portiques au plafond et ses lambris de pierre incrustés de marbre. ▶

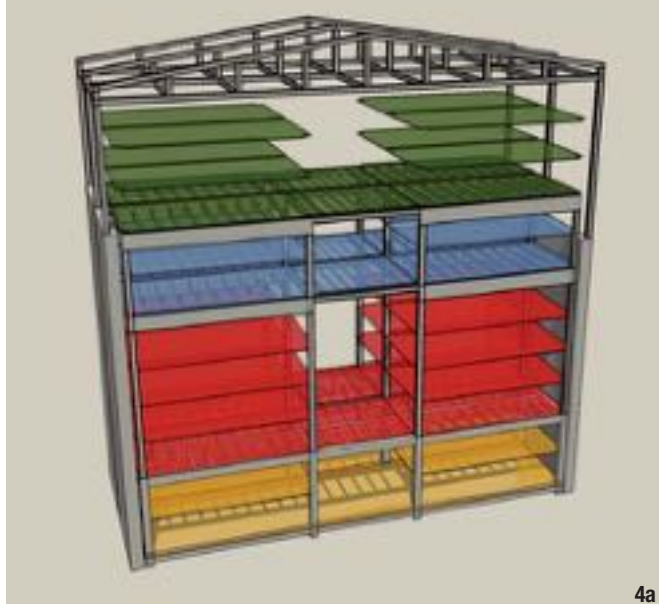
2- Au centre et en bas, en beige, la salle Labrouste et le magasin central de stockage. En jaune pâle, au centre, l'axe de circulation entre la partie côté rue de Richelieu et celle rue Vivienne.

3- La galerie Mazarine, monument historique, devient lieu d'exposition et de circulation entre espaces jusqu'ici séparés.

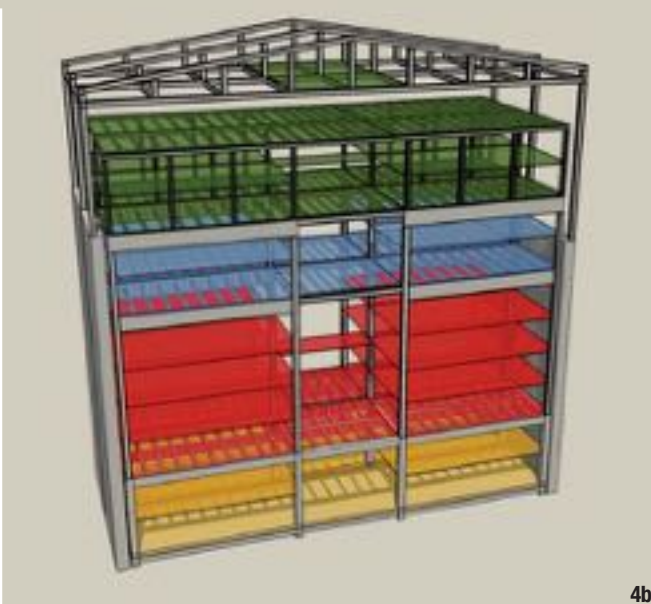


MAGASIN CENTRAL DE LA BIBLIOTHÈQUE AVANT ET APRÈS TRAVAUX

En jaune : sous-sols. En rouge : niveaux Labrouste. En bleu et vert : magasins Roux-Spitz dont ceux conservés en bleu. En vert : étages remodelés.
 Entre ces zones : planchers coupe-feu.



4a



4b

© EGIS BÂTIMENTS

Le vestibule Labrouste devient le centre du quadrilatère. Il s'ouvrira largement sur l'escalier d'honneur une fois le mur qui les sépare démolit. En étage, au-dessus de sa verrière, sera posée une passerelle vitrée (figure 5). Le public l'empruntera pour passer d'une partie de la bibliothèque à l'autre, avec vue sur la cour d'honneur.

TRÉMIE DE 25 M DE HAUT

Autre point à résoudre lors de la reconstruction : les différences de niveau. La démolition de locaux sans caractère patrimonial prononcé va permettre de

les aligner. Douze cages d'escalier desservant tous les étages sont créées sur l'ensemble du site. Des trémies jusqu'à 25 m de haut, soit 11 niveaux, ont été percées (figure 6).

Ces noyaux de circulation constituent un des dispositifs de protection incendie. La bibliothèque est un établissement recevant du public de 1^{re} catégorie. La présence de documents anciens constitue un risque.

L'objectif premier est d'alerter les personnes en cas de sinistre et de les évacuer. Les solutions sont trouvées au cas par cas. « La reconstruction est

4a & 4b- Magasin central de la bibliothèque avant et après travaux.

5- Le public empruntera la galerie vitrée au-dessus du vestibule d'honneur.

à la fois d'une reconstruction lourde et d'une restauration, dans des volumes définis et pour partie protégés au nom des monuments historiques. Autant de pièces, autant de cas de figure, autant de projets. »

FONTE AUTOPORTANTE

Les commissions sécurité et monuments historiques ont travaillé ensemble pour trouver des solutions adaptées à chaque local avec parfois des dérogations. « L'étude d'ingénierie au feu pour la stabilité des structures a duré dix-huit mois, précise François

mille fois plus complexe ici que sur un ancien site industriel, reconnaît Bruno Gaudin qui a lu de près les documents historiques sur la construction. Il s'agit



5

© AGENCE BRUNO GAUDIN



6 © JEAN-CHRISTOPHE BALLOT/OPPIC/BNF



7 © OPPIC/BNF



8 © AGENCE BRUNO GAUDIN

Autier, chef de projets de l'Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture, maître d'ouvrage délégué et pilote de l'opération. *Elle a été confiée au Centre scientifique et technique du bâtiment et validée par Effectis.* » Le traitement du magasin central - stockage de documents - en donne un bon aperçu (figure 7). Au XIX^e, Henri Labrouste loge quatre niveaux de magasin dans le volume ancien haut de plafond. Il recourt à

des structures en fonte autoportantes. Puis, Michel Roux-Spitz, chargé de l'agrandir, en ajoute deux en dessous, en béton, et cinq au-dessus, en acier.

COMPENSATIONS

Dans le projet actuel, les deux niveaux de magasins Roux-Spitz juste au-dessus de ceux de Labrouste sont conservés. Les trois plus élevés sont démolis et remplacés par des étages à plancher coupe-feu. En effet, la réglementation

n'admet pas plus de deux niveaux sans paroi coupe-feu. La partie Labrouste, quant à elle, fait l'objet de dérogations assorties de compensations. Elle compte 4 niveaux non séparés et sa structure en fonte est très loin de tenir au feu deux heures. Il a pourtant été décidé de la maintenir telle quelle à cause de sa valeur patrimoniale bien qu'elle ne soit ni classée ni inscrite à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques.

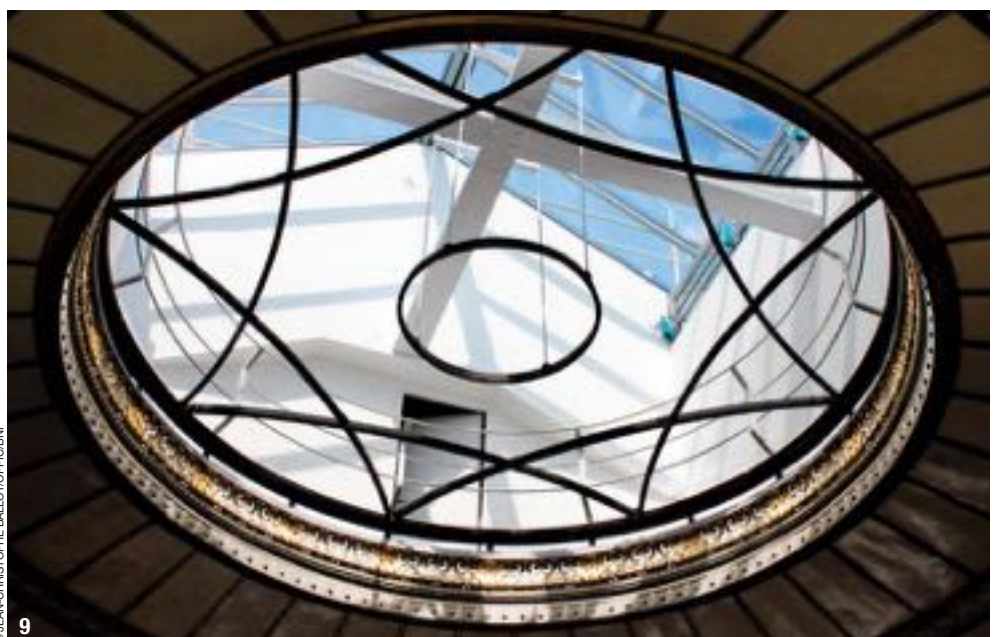
Le volume a été réduit en sacrifiant une trame de 6 m pour créer deux cages d'escalier en béton. Le nombre de personnes admises en même temps a été limité. Chaque niveau de stockage comporte 50% de vide sur sa surface afin d'assurer l'extraction des fumées. Le caillebotis du sol, qui était recouvert de plaques métalliques, sera revêtu d'un second caillebotis en aluminium à maille serrée laissant passer les fumées. ▶

6- Trémie créée pour loger une cage d'escalier sur toute la hauteur du bâti.

7- Le magasin central de stockage de documents d'Henri Labrouste, avant travaux. Au centre, le vide qui contribue au désenfumage. Le plafond de verre disparaît.

8- Les doubles poteaux de la structure Roux-Spitz, en acier, ont été remplis de béton, ce qui réduit la surface exposée à l'incendie.

9- La couronne des oculi en plafond de la salle Labrouste a été surélevée de 10 cm pour évacuer les fumées.



9 © JEAN-CHRISTOPHE BALLOT/OPPIC/BNF

La structure en acier de Roux-Spitz, contrairement à celle en fonte, a pu être recouverte d'une peinture intumescente qui gonfle sous la chaleur, ce qui isole l'acier du feu et en allonge la tenue. Cette solution qui convient pour les poutres a dû être adaptée pour les poteaux installés deux par deux, à 30 cm l'un de l'autre (figure 8). Impossible d'appliquer la peinture dans l'entre-deux. D'où l'idée d'Egis Bâtiments de combler cet espace avec du béton. Ainsi, seule leur face extérieure est-elle exposée au feu et revêtue de la peinture spéciale. Quant aux poutres habillées, elles sont protégées par un flocage fibreux ou pâteux, moins cher. Autre exemple de solutions sur mesure : celles de la salle de lecture Labrouste. En cas de feu, les fumées sont extraites par les oculi en plafond (figure 9). Leur couronne a été surélevée de 10 cm afin de créer un passage d'air suffisant vers les combles cloisonnés et dont la verrière s'ouvre quand nécessaire.

PLANCHER PLUS LÉGER

« L'équipe d'ingénierie du feu a également étudié la tenue au feu des hautes colonnes en fonte soutenant le plafond de cette salle, explique Jérôme Masselot, ingénieur structures d'Egis Bâtiments. La simulation par ordinateur a montré qu'il fallait éloigner les tables en bois d'au moins 1,50 m des poteaux. » Les rayonnages en bois en périphérie de la salle sont séparés de la

fonte par une coursoive. Egis Bâtiments a aussi vérifié la capacité portante des planchers dans les magasins.

La charge d'exploitation à retenir pour le stockage de livres est de 650 kg/m² sur toute la surface du sol.

« La résistance des sols n'était pas à ce niveau, a observé M. Masselot. Il n'était pas envisageable de renforcer les poutres. Nous avons repris les calculs de la manière identique à ceux de l'époque. Ils avaient différencié la surface de rayonnages et les allées. Un rayonnage pesait plus de 650 kg/m² mais était placé sur les poutres et à proximité des appuis. »

Cette implantation, acceptable, devra donc être respectée.

Dans le magasin Labrouste, des essais de chargement ont été effectués. Aucun renforcement de plancher n'est nécessaire en phase 1 de la restructuration.

10- Curiosité :
à droite, toiture ancienne cha-peauté par l'agrandissement de Roux-Spitz dont on aperçoit le mur à gauche et la verrière.

11- Seconde salle de lecture monumentale : la salle Ovale (construction 1897-1936).



11

© DAVID CARRENF

QUATRE SIÈCLES DE CONSTRUCTION

Au XVI^e siècle, Charles V esquisse un premier fonds officiel avec un millier d'ouvrages au Louvre à Paris, puis François 1^{er} instaure le dépôt légal des imprimés au château de Blois (Loir-et-Cher). Au XVII^e, Louis XIV demande à Colbert de développer la bibliothèque royale. Début XVIII^e, elle s'installe dans la galerie Mazarine puis dans le palais du cardinal Mazarin, à Paris, en partie sud du site actuel*.

Au XIX^e, la bibliothèque est modernisée. Salles de lecture et ouvrages sont séparés. Napoléon III fait appel à Henri Labrouste. L'architecte construit notamment la "salle de travail des livres imprimés" (1870), aujourd'hui salle de lecture portant son nom, et un magasin sur 4 niveaux à structure en fonte.

La bibliothèque n'occupe totalement le quadrilatère Richelieu qu'après rachat d'une parcelle rue Vivienne en 1883. Jean-Louis Pascal puis Alfred Recoura y construisent la salle Ovale (1897-1936), seconde salle de lecture de 18 m sous plafond.

On doit les structures en acier du magasin central à Michel Roux-Spitz, architecte des monuments historiques de 1932 à 1954 qui procède à plusieurs agrandissements.

CONTENIR LES MODIFICATIONS

D'autres modernisations ponctuelles ont lieu jusque dans les années 1980. La restructuration actuelle est la première de cette envergure. « Deux organisations se sont édifiées en parallèle mais sans aucune transversalité, observe Bruno Gaudin, architecte, dans le dossier patrimonial de 2009. (...) Deux grands axes de composition, deux cours urbaines, deux salles de lecture sont à mettre en état d'échanger et de communiquer. (...) La rénovation est à lire comme une nouvelle étape. Le mouvement perpétuel d'ajustements a désormais de nouveaux objectifs. (...) Notre intervention vise à contenir les modifications en des espaces limités "nécessaires et suffisants" et dont les effets attendus sont multiples et décuplés. »

* Source : www.bnf.fr.



10

© AGENCE BRUNO GAUDIN



© AGENCE BRUNO GAUDIN

12

2^{de} PHASE : FINALISER LES LIAISONS INTÉRIEURES

La restructuration du site historique de la Bibliothèque nationale de France à Paris 2^e entre dans sa seconde phase. Elle concerne la partie longeant la rue Vivienne à l'est du quadrilatère. L'avant-projet définitif de cette phase, remis en juillet par la maîtrise d'œuvre, est en négociation. Les entreprises seront consultées en 2015 pour des travaux à partir de 2016.

Dans cette moitié du quadrilatère Richelieu, se trouve la salle de lecture Ovale qui va faire l'objet comme son aînée, la salle Labrouste, d'une mise aux normes, ses magasins de stockage aussi, vis-à-vis de la protection incendie. Planchers coupe-feu et nouvelles circulations verticales seront, là aussi, introduits. La réfection des peintures de la salle pourrait faire l'objet d'un mécénat.

Figurent dans cette phase, les galeries Mansart et Mazarine classées monuments historiques. Leurs revêtements muraux - peintures, stucs, etc. - seront restaurés. Située au centre du quadrilatère, la galerie Mazarine servira de liaison à l'étage entre le côté Labrouste (phase 1) et l'hôtel Tubeuf (phase 2) qui abrite la salle de lecture cartes et plans, et celle des estampes. Actuellement, il faut passer par l'extérieur.

44 % DE L'OPÉRATION

À partir de l'entrée rue Vivienne, les lecteurs accèdent actuellement à la salle Ovale par un hall où trône un escalier de pierre encaissé entre des murs. Bien qu'il ait été inscrit en 1983 à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques, il ne sera pas conservé. « *Grand par la dimension plus que par le caractère, il n'est ni lisible depuis l'entrée Richelieu où il fait face abruptement à un mur, ni utile depuis l'entrée Vivienne où il fait obstruction à l'entrée de la salle Ovale*, constate Bruno Gaudin, architecte. *De l'escalier, nous conservons l'essentiel, c'est-à-dire le vide - la verrière - un volume de lumière vertical.* » Dans ce volume, il est prévu de loger un escalier hélicoïdal, en acier à marches en pierre.

La seconde phase compte pour 44 % des 218 millions d'euros de ce chantier financé à 80 % par le ministère de la Culture et de la Communication et à 20 % par celui de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

UNE OPÉRATION DE VINGT ANS

1999 : début de la programmation de la restructuration du site historique de la Bibliothèque nationale de France, 58 rue de Richelieu, Paris 2^e.

2007 : appel d'offres maîtrise d'œuvre.

2007-2010 : études architecturales et techniques.

2010-2015 : préparation et travaux phase 1, côté rue de Richelieu.

2014-2015 : remise avant-projet définitif phase 2, côté rue Vivienne, négociation.

Début 2015 : appel d'offres entreprises, seconde phase.

2015-2019 : travaux phase 2.

12- Simulation de l'escalier d'honneur en métal qui remplacera celui tout en pierre dans le futur grand hall de la bibliothèque.

Tous les réseaux techniques sont renouvelés ainsi que les équipements de climatisation. « *Il existe maintenant 17 locaux de chauffage, ventilation et conditionnement d'air auxquels s'ajoutent les armoires de climatisation*, explique Régis Lelièvre, directeur du chantier d'Egis Bâtiments. *Ce n'est pas facile pour les entreprises de les loger dans les rotondes sous toiture et de ménager un espace autour pour l'entretien.* »

PLATE-FORME D'ÉCHANGES

Le chantier est exigü. Le bâti réserve des surprises et des curiosités (figure 10). Les matériaux sont acheminés par monte-charge puis à la main. Maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre et entreprises collaborent sur une plateforme d'échanges par internet. □

Il fallait aussi s'assurer que la structure métallique de Roux-Spitz supporterait la création de planchers coupe-feu et le poids des stockages supérieurs.

Le plancher du niveau 14, l'avant-dernier avant les combles, pèse 200 kg/m² là où un tout en béton monterait à 500 kg/m².

Il se compose d'un bac en acier contenant un isolant et surmonté d'une couche de 6 cm de béton.

Ailleurs, les nouveaux planchers sont du même type mais sans isolant et remplis de 17 cm de béton. Ils sont collaborants, le métal contribuant à la tenue du plancher, ce qui diminue l'épaisseur de béton.

⁽¹⁾ Cf. *Travaux* mars 2014, page 8.

⁽²⁾ La Bibliothèque nationale de France comprend également deux sites de conservation dans la Sarthe et en Seine-et-Marne, la Bibliothèque de l'Arsenal, la Bibliothèque musée de l'Opéra et la Maison Jean Vilar (Avignon).

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE DÉLÉGUÉE : Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (Oppic) mandaté par les ministères de la Culture et de la Communication, et celui de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Bruno Gaudin, architecte mandataire ; Egis Bâtiments, bureau d'études techniques généraliste ; L'observatoire 1, concepteurs lumière ; Casso, préventionniste et système de sécurité incendie.

MAÎTRISE D'ŒUVRE MONUMENTS HISTORIQUES : Jean-François Lagneau (1^{re} phase), architecte en chef, et Ct Cizel, économiste.

ENTREPRISES

GROS ŒUVRE, CHARPENTE MÉTALLIQUE, COUVERTURE, SOLS DURS : Eiffage Construction.

CHAUFFAGE, VENTILATION, CLIMATISATION : Eiffage Thermie (Forclim-Cargocaire).



© PHOTOTHÈQUE SOCOTRAP

REPRISE EN SOUS-ŒUVRE COMPLEXE D'UNE ÉGLISE AU CŒUR DE TOULOUSE

AUTEUR : OLIVIER GOËNAGA, DIRECTEUR D'AGENCE, KELLER SUD-OUEST

UNE ANCIENNE ÉGLISE EST TRANSFORMÉE EN IMMEUBLE DE BUREAUX. LA REPRISE EN SOUS-ŒUVRE COMPRENANT LA CRÉATION D'UN NIVEAU DE SOUS-SOL DANS UN TERRAIN SANS COHÉSION ET BAINÉ PAR LA NAPPE PHRÉATIQUE EST RÉALISÉE PAR JET GROUTING. CETTE TECHNIQUE ASSURE TROIS FONCTIONS : REPRISE DES DESCENTES DE CHARGE, SOUTÈNEMENT, ÉTANCHÉITÉ.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Le projet consiste en la réhabilitation de l'église Notre Dame des Grâces au centre-ville de Toulouse (31) afin de la transformer en immeuble de bureaux, futur siège régional de Kaufman et Broad. Cette église, désacralisée depuis

plusieurs dizaines d'années, a abrité des activités diverses : station-service, atelier de mécanique, établissement bancaire.

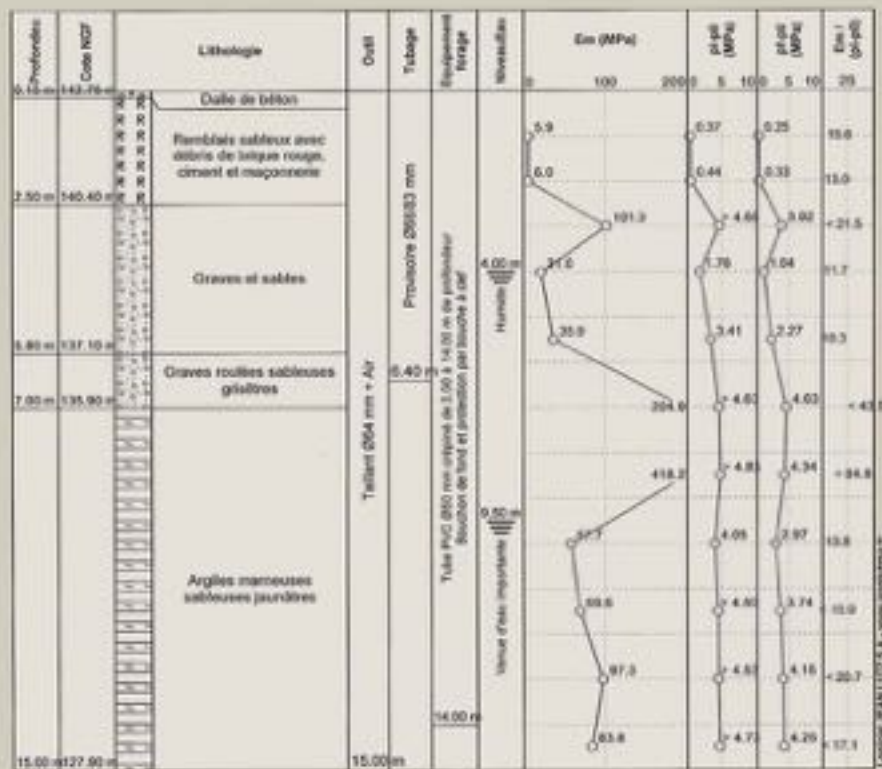
Cette évolution dans le temps de l'exploitation du lieu a modifié la structure de l'ouvrage avec des parties en vide sanitaire, des zones sur terre-plein

1 - Édifice avant travaux.

1 - Building before works.

et une salle des coffres au centre. Hormis la complexité d'un chantier urbain, l'équipe de maîtrise d'œuvre a dû prendre en compte l'historique du site pour créer un immeuble R+5 avec un niveau de sous-sol généralisé à -3 m de profondeur sous le TN tout en conservant les quatre façades (figure 1).

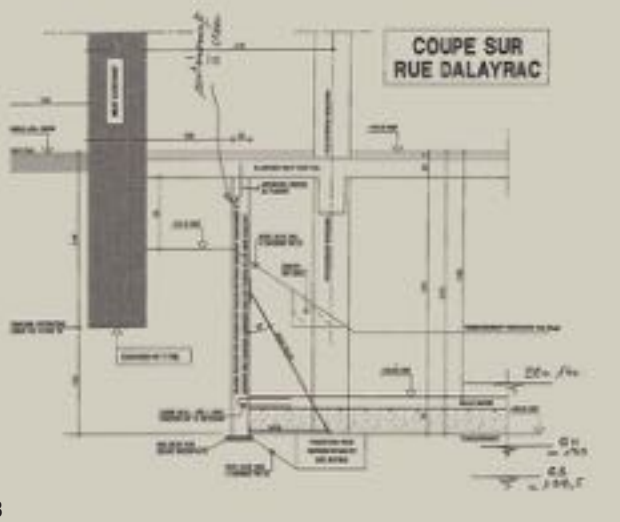
EXTRAIT DU RAPPORT DE SOL DE FONDASOL



© PHOTO THÉRIE KELLER FONDATIONS SPÉCIALES

2

EXEMPLE DE SOLUTION ÉTUDIÉE (donnée Bettec)



© PHOTO THÉRIE KELLER FONDATIONS SPÉCIALES

3

LE CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDROLOGIQUE

La géologie toulousaine est la suivante (figure 2 et tableau A) :

- Des remblais constitués de limons avec cailloutis ou sables avec débris de briques, de ciment et de maçonnerie jusqu'à 0,5/2,5 m de profondeur ;
 - Une couche d'alluvions sablo-graveleuses jusqu'à 3 à 7 m de profondeur, ayant des caractéristiques mécaniques bonnes à très bonnes ;
 - Des argiles marneuses sableuses au-delà, présentant des caractéristiques géotechniques excellentes.
- Dans le cadre de la mission G2 PRO, Fondasol a déterminé les paramètres géotechniques (figure 3) pour le dimensionnement des ouvrages de fondations. Les principaux niveaux d'eaux retenus au droit du projet sont :
- **Eau Basse** : 138,50 NGF,
 - **Eau Haute** : 139,00 NGF,
 - **Eau Exceptionnelle** : 140,00 NGF.

LES PRINCIPALES CONTRAINTES DU SITE

Pour la réalisation du sous-sol à l'altitude de 139,4 NGF, l'entreprise et l'équipe d'ingénierie ont dû prendre en compte les principales contraintes suivantes à savoir :

- L'historique de la construction (vieux bâtiments toulousains) ;
- La structure de l'ouvrage (mur en brique non harpé) ;
- Le contexte urbain limitant les terrassements ;
- Les conditions d'accès à l'intérieur de l'ouvrage (ouverture de faible dimension) ;
- Le phasage de démolition et de reconstruction ;
- La nécessité de conserver les files porteuses entre la nef et le bas-côté pour butonner les façades extérieures pendant les reprises en sous-œuvre ;
- La position du butonnage provisoire ;
- La présence de murs extérieurs en briques et galets cimentés non fondés ou très faiblement (niveau d'assise environ 138,4 NGF) ;
- La présence de graves sans cohésion ;
- La présence d'eau à faible profondeur en limite avec le niveau du sous-sol projeté.

Pour répondre à ces différentes contraintes, l'entreprise générale a été sollicitée dès la phase conception afin d'élaborer avec la maîtrise d'œuvre différentes solutions.

TABLEAU A : LA GÉOLOGIE TOULOUSAINE

Couche de sol	Toit (NGF)	Base (NGF)	PI (MPa)	Pf (MPa)	Em (MPa)	α	Cu (CT) (KPa)	Φ (CT) (degré)	C' (LT) (KPa)	Φ' (LT) (degré)	γ (KN/m ³)
Remblais	142.50	139.60	0.4	0.3	6	0.66	25	15	0	25	17
Graves sableuses	139.60	135.90	2.1	1.4	25	0.33	10	20	1	32	19
Argile marneuses	135.90	130.00	> 4.5	3.5	48	0.66	100	0	20	27	21

Ces réflexions techniques ont été menées en intégrant leurs coûts, le délai, la sécurité des exécutants et la maîtrise des aléas. Il a été proposé entre autres :

- Une reprise en sous-œuvre par passe (solution téméraire et économique) ;
- Une paroi en pieux tangents associés à un contre-voile en retrait de la façade (solution usuelle et couramment mise en œuvre sur Toulouse) ;
- Un terrassement par passes avec la création d'un voile butonné en retrait de la façade (figure 3) ;
- Une micro berlinoise avec des micropieux au plus proche des façades.

La solution de Keller Fondations Spéciales a été de reprendre en sous-œuvre l'ensemble des 4 façades et de certains poteaux à l'aide de demi-colonnes de jet grouting double posées dans les graves (figure 4).

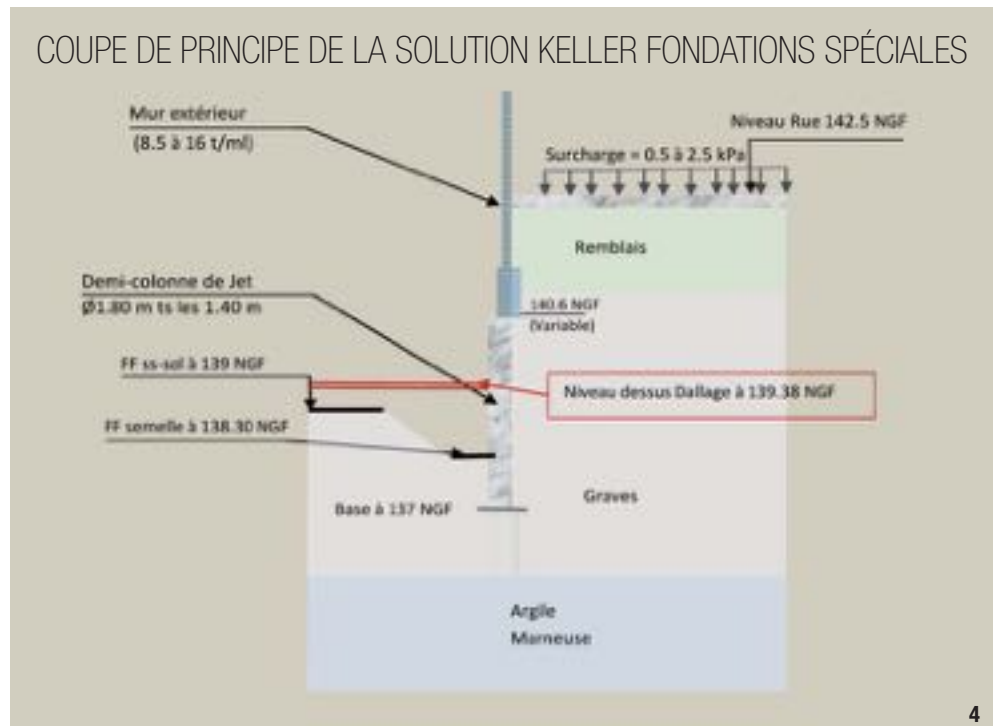
Cette solution variante, fruit d'une grande expérience sur des chantiers similaires, permet :

- De s'affranchir des venues d'eaux horizontales ;
- De reprendre les charges de la structure par la création d'une paroi provisoire ;
- De terrasser en une passe l'ensemble de la fouille ;
- D'agrandir le sous-sol car la paroi est positionnée à l'aplomb des façades ;
- De maîtriser les déplacements éventuels des avoisinants ;
- De renforcer les fondations actuelles ;
- De diminuer le délai global des travaux ;
- De travailler en sécurité vis-à-vis de l'activité des autres corps de métier.

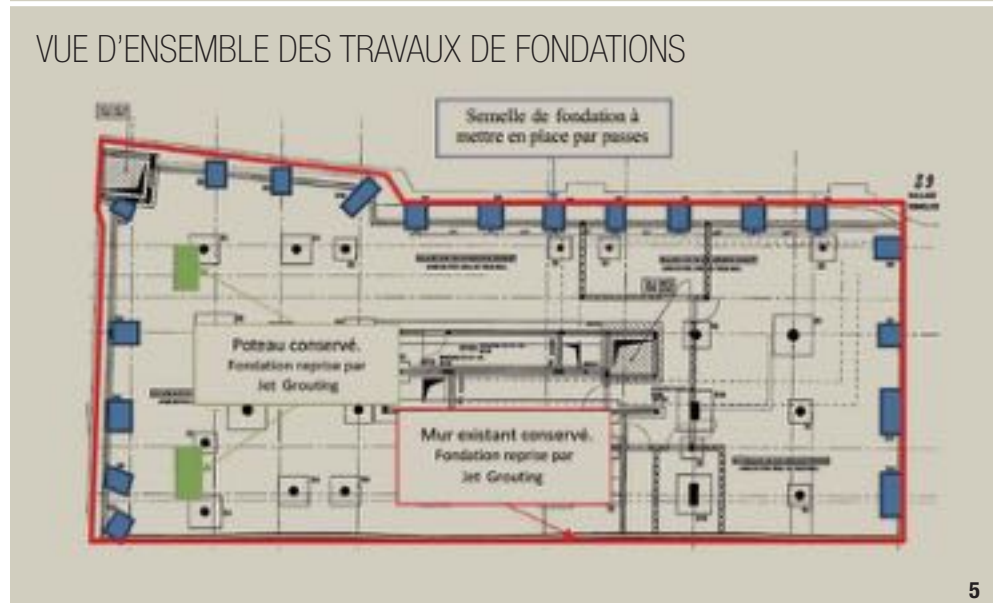
Une analyse globale intégrant le délai, les risques sur avoisinants, le phasage des démolitions, les avantages des différentes solutions et leur coût a été menée par l'équipe du chantier et a conduit à retenir la solution de reprise en sous-œuvre par jet grouting.

Le maître d'ouvrage, fortement impliqué, s'est positionné en professionnel de la construction et a souhaité mettre en œuvre une solution sécuritaire pour le personnel, bien maîtrisée quant aux risques et fiabilisée quant au délai global, même si son coût était élevé.

Au niveau de la conception de l'ouvrage, seules les quatre façades sont conservées en raison de leur intérêt historique, mais elles n'ont pas de fonction porteuse. Le nouvel immeuble est fondé de manière indépendante au centre de la



4 © PHOTOTHÈQUE KELLER FONDATIONS SPÉCIALES



5 © PHOTOTHÈQUE KELLER FONDATIONS SPÉCIALES

fouille sur des semelles filantes et isolées coulées dans les graves (figure 5).

PRINCIPE GÉNÉRAL DE CONSTRUCTION

Le phasage général, intégrant la démolition, est le suivant :

- Démolition des voûtes et toitures (figure 6) ;
- Mise en place d'un système de butonnage des façades et des deux poteaux à l'entrée ;
- Arase des têtes des murs ;
- Maintien du plancher du rez-de-chaussée ;

4- Coupe de principe de la solution Keller Fondations Spéciales.

5- Vue d'ensemble des travaux de fondations.

4- Schematic cross section of the Keller Fondations Spéciales solution.

5- General view of foundation works.

- Réalisation des colonnes de jet grouting (demi-colonne et colonne entière) depuis le plancher existant à 142,91 NGF ;
- Démolition du plancher existant et terrassement jusqu'à la cote 138,95 NGF ;
- Mise en place d'un matelas soigneusement compacté (épaisseur 30 cm) et du dallage (épaisseur 30 cm) : niveau dessus dallage à 139,38 NGF ;
- Exécution des semelles de fondations coulées à pleine fouille dans les graves ;



6

© PHOTOTHÈQUE GARCIA DEMOLITION

→ Mise en place d'un voile contre les colonnes de jet grouting ayant un rôle d'étanchéité et de soutènement vis-à-vis de la poussée hydraulique.

LE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

Les calculs sont menés à partir des paramètres de sol et des coefficients de sécurité de l'EC7 à long terme pour la phase définitive et à court terme pour la phase provisoire.

Les calculs sont réalisés à l'aide du logiciel UNDERPIN développé par GGU. Ce logiciel permet de calculer la stabilité des murs poids.

Les différents calculs en phase provisoire ont été menés en intégrant le poids des murs existants (charge de l'ordre de 8 à 16 t/m), la surcharge des voiries à proximité (0,5 t/m²) et le phasage des terrassements pour la mise en œuvre des semelles.

Des échanges réguliers entre les bureaux d'étude de Keller et de Socotrap ont permis de prendre en compte les dernières informations du chantier et un déplacement horizontal maximal des ouvrages inférieur au centimètre. Au vu des éléments ci-dessus, la paroi de jet grouting avait une épaisseur minimale de 0,80 m et la résistance à la compression à 28 jours des colonnes

6- Démolition en cours.

7- Extrait plan d'implantation des colonnes.

6- Demolition in progress.

7- Excerpt from the column layout drawing.

de jet était supérieure à 6 MPa. Pour ce faire, la paroi de reprise en sous-œuvre a été constituée de demi-colonnes de jet grouting d'un diamètre supérieur à 1,8 m et d'un entraxe de 1,4 m (figure 7).

Cette technique de demi-colonnes permet de réaliser la paroi de reprise en sous-œuvre uniquement à l'aplomb du mur et de limiter fortement le rabattement côté fouille lors des terrassements généraux.

Ce dimensionnement et le phasage avec le gros œuvre ont permis de s'affranchir de la mise en œuvre d'armatures dans la paroi ou d'ancrages.

TRAVAUX DE JET GROUTING PRINCIPE GÉNÉRAL

Les colonnes de jet grouting seront réalisées selon la norme EN 12716 (décembre 2001).

Après avoir carotté la dalle basse, un forage de faible diamètre (146 mm) est réalisé jusqu'à la profondeur requise dans la note de calcul (ancrage dans les graves). Outillage : train de tiges 88,9 mm - taillant trilame 110 mm - aléseur 146 mm.

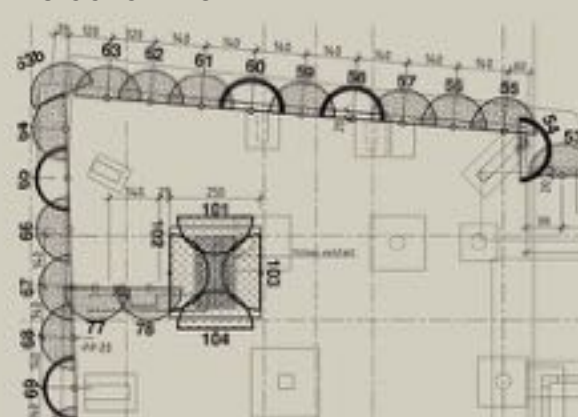
Une fois atteinte cette profondeur, on met en œuvre un jet de coulis de ciment horizontal, enrobé d'air, à très haute énergie, qui déstructure le terrain environnant sur un certain rayon d'action fonction de la pression et du débit du coulis. Le rayon d'action, d'environ 2 m, dépend en grande partie de la nature du sol.

Ce terrain déstructuré mélangé au coulis de lançage constitue le spillo qui remonte à la surface dans le vide annulaire le long du forage par effet d'air lift.

Le procédé évite ainsi le risque de surpression dans le terrain (figure 8). ▷

© PHOTOTHÈQUE KELLER FONDATIONS SPÉCIALES

EXTRAIT PLAN D'IMPLANTATION DES COLONNES



7

La pression (environ 400 bars) et le débit du jet horizontal (> 300 l/min) se transforment en énergie cinétique ; ceci permet de découper le sol suivant l'amplitude recherchée.

La rotation régulière de la tige de forage, à savoir un mouvement oscillant de 360° par exemple, combinée à un mouvement ascendant continu et prédéterminé, permet de générer les colonnes. L'amplitude des oscillations a été modifiée afin de réaliser des demi-colonnes (180°). Cette reprise en sous-œuvre par jet grouting permet d'une part de redonner de la cohésion avec les anciennes fondations en galets cimentés et d'autre part d'assurer un contact parfait entre le mur en briques et la paroi (figure 9).

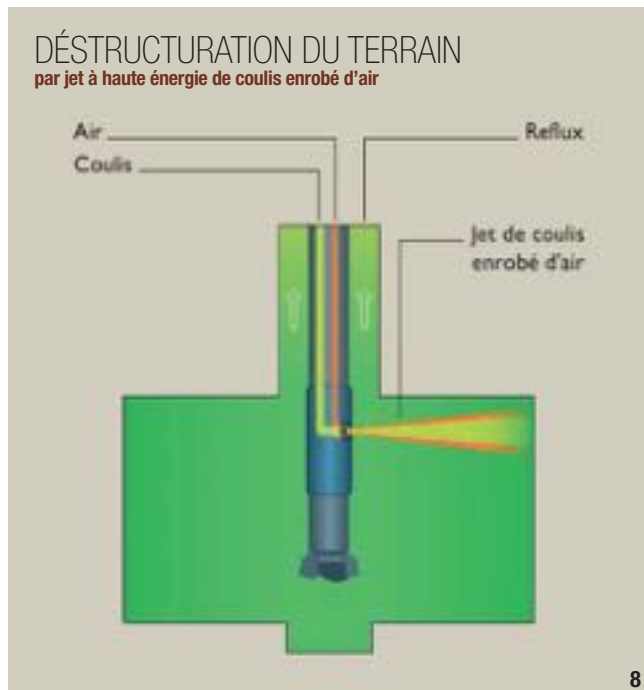
CONTRÔLES

Les points de contrôle sont mis en œuvre à chaque phase de la production avec, au démarrage du chantier, la réalisation d'un plot d'essai.

Le principal objectif de ce dernier est de caler les paramètres de forage et d'injection permettant de garantir les objectifs de diamètre et de résistance des colonnes de jet grouting.

Lors de l'exécution industrielle des colonnes, des prélèvements d'éprouvettes de spoil et de coulis sont effectués, sur lesquelles on contrôle leur composition et leur résistance.

Également, les enregistrements de paramètres de la foreuse et de la centrale permettent de valider la bonne



8- Déstructuration du terrain par jet à haute énergie de coulis enrobé d'air.

9- Contact jet mur en brique.

8- Destructuring of the ground by high-energy jet grouting sheathed in a cone of air.

9- Contact of the jet with the brick wall.

- Deux silos de ciment ;
- Un compresseur : 5 000 l/mn - 8 bars.

GESTION DES SPOILS

Une gestion des spoils efficace a été mise en place afin de ne pas pénaliser la foreuse et respecter les cadences définies au planning.

En effet ceux-ci ont été évacués préférentiellement sous forme liquide à l'aide de camions toupies qui restaient en rotation entre le chantier et la décharge agréée.

De plus, l'ancienne salle des coffres a servi de bac de décantation pour un stockage tampon permettant de pallier les contraintes de la circulation en site urbain.

exécution des travaux conformément au plan d'assurance qualité. De plus, des nivellements réguliers des façades sont faits afin de détecter les éventuels mouvements.

MOYENS MIS EN ŒUVRE

Une équipe de 6 personnes était mobilisée pour exécuter ces travaux de jet grouting.

Le matériel mis en œuvre pour la bonne exécution des travaux était le suivant :

- Foreuse Keller dernière génération : KB 1 avec groupe déporté (figure 10) ;
- Une station de malaxage automatique de coulis type Keller AKM ;
- Une station de pompage haute pression Techniwell TW 600 ;
- Pompes à vide pour évacuation des spoils ;





10

10- Foreuse Keller dernière génération : KB 1 avec groupe déporté.

11- Vue générale de la fouille une fois terrassée.

10- Latest-generation Keller driller: KB 1 with offset unit.

11- General view of the excavation after earthworks.



11

CONCLUSION

Les travaux de reprise en sous-œuvre par jet grouting ont permis de réaliser le gros œuvre dans de très bonnes conditions, de maîtriser les éventuelles défor-

mations des avoisinants et de garantir le délai de livraison de l'ouvrage au maître de l'ouvrage Kaufman & Broad. Cette technique de reprise en sous-œuvre est particulièrement bien adap-

tée à ce type de réhabilitation en zone urbaine avec présence d'eau à faible profondeur. Elle permet de travailler en sécurité, notamment dans la phase de terrassement (figure 11). □

PRINCIPALES QUANTITÉS

LINÉAIRE DE VOILE :
113 m

NOMBRE DE COLONNES :
88 unités

DIAMÈTRE DES COLONNES :
environ 1,8 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Kaufman & Broad

MAÎTRE D'ŒUVRE : Taillandier Architecte

BUREAU D'ÉTUDE DE SOL : Fondasol

BUREAU DE CONTRÔLE : Veritas

BUREAU D'ÉTUDE BÉTON : Bettac

ENTREPRISE GÉNÉRALE : Socotrap (gros œuvre) - Gracia Démolitions (démolition)

ENTREPRISE DE FONDATIONS SPÉCIALES : Keller Fondations Spéciales

ABSTRACT

COMPLEX UNDERPINNING OF A CHURCH IN THE CENTRE OF TOULOUSE

OLIVIER GOÉNAGA, KELLER SUD-OUEST

For the renovation of Notre Dame des Grâces church in the Toulouse city centre, a religious building used for secular purposes for many years now, tricky underpinning was required. It was necessary to create a basement level in materials with no cohesion and bathing in the groundwater aquifer. The solution adopted, based on the double jet grouting technique, was able to perform three essential functions for the same structure: underpinning of vertical loads, temporary retaining of surrounding earth and temporary waterproofing of the excavation. These works, performed in a short period of time, were able to simplify renovation work sequencing and permitted the dry excavation of earth at the underground level in stringent safety conditions. □

RECALCE DE CIMIENTOS COMPLEJO DE UNA IGLESIA EN EL CENTRO DE TOULOUSE

OLIVIER GOÉNAGA, KELLER SUD-OUEST

En el marco de la rehabilitación de la iglesia Notre Dame des Grâces en el centro de la ciudad de Toulouse, edificio religioso utilizado con fines laicos desde hace muchos años, era preciso realizar un delicado recalce de cimientos. Había que crear un nivel de subsuelo en materiales sin cohesión y bañados por la capa freática subterránea. La solución adoptada, basada en la técnica de jet grouting doble, permite cumplir tres funciones esenciales para la misma estructura: recalce de las cargas verticales, contención provisional del terreno periférico y estanqueidad provisional de la excavación. Estas obras, realizadas en un breve espacio de tiempo, han permitido simplificar el calendario de ejecución de las obras de rehabilitación y han hecho posible la excavación del terreno del subsuelo en seco con condiciones de seguridad reforzadas. □



© CÉDRIC HELSLY POUR SOLETANCHE BACHY

JET-GROUTING POUR MONUMENT EN PÉRIL À SAINT-GERMAIN DE CHARONNE

AUTEURS : ROBERT PORET, DIRECTEUR TRAVAUX SOLETANCHE BACHY FRANCE - JEAN-FRANÇOIS LAGNEAU, ARCHITECTE EN CHEF DES MONUMENTS HISTORIQUES

POUR PÉRENNISER CETTE ÉGLISE MULTISÉCULAIRE, ÉRIGÉE SUR DES FONDATIONS INSUFFISANTES ET QUI A CONNU DES AMÉNAGEMENTS SUCCESSIFS AU FIL DU TEMPS, LA VILLE DE PARIS A PROGRAMMÉ UNE CAMPAGNE DE SAUVEGARDE DONT LES TRAVAUX DE REPRISE EN SOUS-ŒUVRE, PAR JET GROUTING, PERMETTRONT DE CONSOLIDER L'ASSISE DU BÂTIMENT.

L'église de Saint-Germain de Charonne est un édifice multi-séculaire (voir encadré « Un peu d'Histoire ») implanté dans le 20^e arrondissement de la capitale, sur le flanc sud d'un coteau très escarpé. Elle est fondée sur des remblais et colluvions composés d'argiles sableuses et de marnes vertes, le bon sol n'ap-

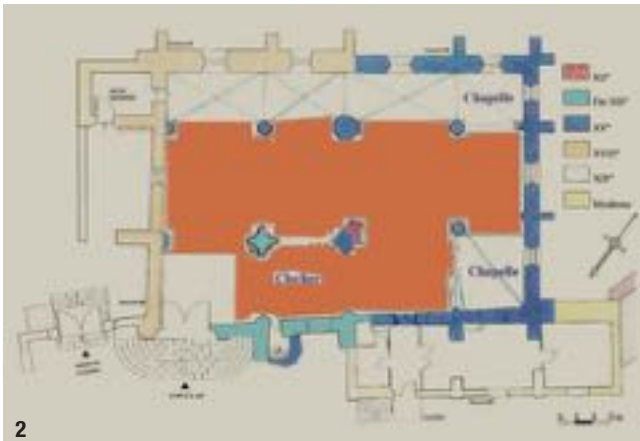
paraissant qu'à partir d'une dizaine de mètres de profondeur. De plus, les niveaux des fondations sont très disparates, en raison notamment d'un mode de construction du bâtiment largement étalé dans le temps : ces fondations, déstructurées, sont de fait composées d'un moellonnage grossier hourdé à la chaux.

1- L'église Saint-Germain de Charonne et les installations de chantier.

1- Saint-Germain de Charonne church and the construction plant.

UNE PATHOLOGIE SÉCULAIRE

L'étude historique a révélé que, s'il est vrai que l'édifice bougeait depuis longtemps (figure 5), il connaissait néanmoins depuis quelques décennies une période de stabilité. Mais, au début de l'an 2000, des fissures étaient réappares, situées tout d'abord au niveau des arcs-boutants construits au XIX^e siècle



2



3

UN PEU D'HISTOIRE

L'église de Charonne est l'église paroissiale de l'ancien village de Charonne, annexé à Paris en 1859, et l'une des rares qui n'aient pas été reconstruites. Elle se dresse sur le flanc sud d'un coteau très escarpé ; entourée de son cimetière, elle constitue l'un des derniers enclos funéraires de la capitale, avec celui de Saint-Pierre de Montmartre. Elle aurait été construite sur l'emplacement d'un oratoire élevé en mémoire de la rencontre de sainte Geneviève et de saint Germain, évêque d'Auxerre, au cours du V^e siècle. Si l'on trouve au droit du clocher les vestiges d'une construction du XIII^e siècle, l'église actuelle date essentiellement du XV^e siècle, avec des interventions ultérieures à la période classique. Incendiée à la fin du XVII^e siècle, elle sera grossièrement réparée et restera amputée de sa façade ouest, et probablement de sa travée adjacente (figures 2 à 4). Du fait d'importants travaux de voirie réalisés au début du XIX^e siècle, elle domine maintenant largement son environnement grâce à de hauts murs de soutènement en meulière. L'église est classée Monument Historique depuis le 23 mai 1923 et elle est affectée au culte catholique.



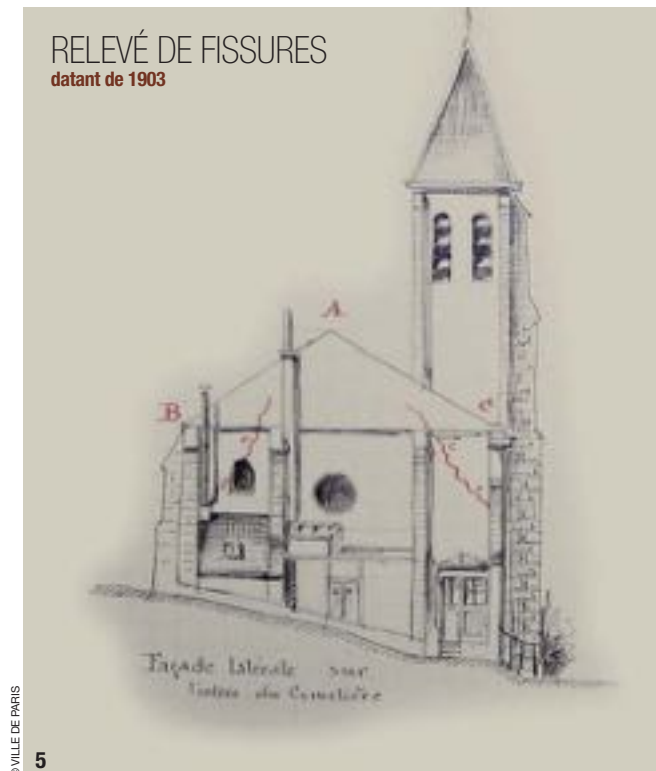
4

© VILLE DE PARIS

- 2- Différentes époques de construction.
- 3- Plan du quartier datant de la deuxième moitié du XVIII^e siècle.
- 4- Dessin du quartier vers 1750.
- 5- Relevé de fissures datant de 1903.

- 2- Various construction periods.
- 3- Map of the district dating from the second half of the 18th century.
- 4- Drawing of the district around 1750.
- 5- Crack report dating from 1903.

RELEVÉ DE FISSURES datant de 1903



5

© VILLE DE PARIS

contre le flanc sud. Après la restauration des toitures, de l'orgue et de sa tribune en 2005, la municipalité procéda à l'examen des réseaux enterrés avant de commander, en 2007, une étude approfondie. Les sondages géologiques et archéologiques confirmèrent alors la médiocre qualité du terrain et la faible assise des fondations. Les fissures se sont ensuite considérablement développées au cours de l'année 2009, avec l'apparition de véritables coulèures parcourant les parements et les voûtes de l'édifice. À noter que ces désordres ne se limitaient pas à l'édifice et à ses abords, mais qu'ils s'étendaient également aux murs de soutènement du parvis et du cimetière. Eux aussi présentaient de larges fractures horizontales ou verticales. Ces ouvrages, dont la résistance se révèle aujourd'hui insuffisante, ont été érigés dans les années 1930, suite aux travaux d'abaissement du niveau de la rue de Bagnolet. Ces travaux entraînèrent en effet la démolition des bâtiments qui formaient, au-devant de l'église, l'alignement de la rue. ▷



6 © CÉDRIC HELSLEY POUR SOLETANCHE BACHY

6- Vue des bracons métalliques.

7- Vue en plan de l'église avec l'implantation des colonnes.

8- Coupe type des colonnes de jet grouting sous un mur.

9- Coupe type des colonnes de jet grouting sous un poteau.

6- View of the metallic struts.

7- Plan view of the church with the layout of the columns.

8- Typical cross section of jet grouting columns under a wall.

9- Typical cross section of jet grouting columns under a pillar.

Les démolitions constituent très probablement l'une des causes supplémentaires de la déstabilisation du site en aval de l'église. Après cette nouvelle alerte, l'église fut alors fermée au public le 2 décembre 2009 en application des recommandations du rapport technique établi par le Département des Édifices Culturels et Historiques de la Ville de Paris. Une nouvelle phase de travaux,

destinés à sécuriser le bâtiment, fut alors entreprise.

Elle consista à garantir le maintien de la façade sud-est, la plus sensible, grâce à la mise en œuvre d'un dispositif de bracons métalliques et de massifs sur micropieux (figure 6).

Les déformations étaient, par ailleurs, contenues au moyen d'un corsetage intérieur constitué de cintres en bois.

UNE INTERVENTION URGENTE

Outre cette opération de sécurisation immédiate à caractère provisoire, il s'agissait essentiellement de sauver l'édifice d'un effondrement certain, en agissant directement sur ses fondations, afin de reporter correctement les charges sur le bon sol. Pour ce faire, une campagne de reprise en sous-œuvre a été menée : elle nécessitait six

mois d'intervention, avec notamment la réalisation de 190 colonnes de jet grouting en jet simple (voir encadré : Le jet grouting pour les nuls) de 3 à 10 m de profondeur (diamètre 0,80 et 1 m) (figures 7 à 9). À noter que la possibilité de régénérer la base des anciennes maçonneries, en venant les imprégner de « spoil », représentait un atout en faveur de cette technique.

VUE EN PLAN DE L'ÉGLISE
avec l'implantation des colonnes



7

© SOLETANCHE BACHY

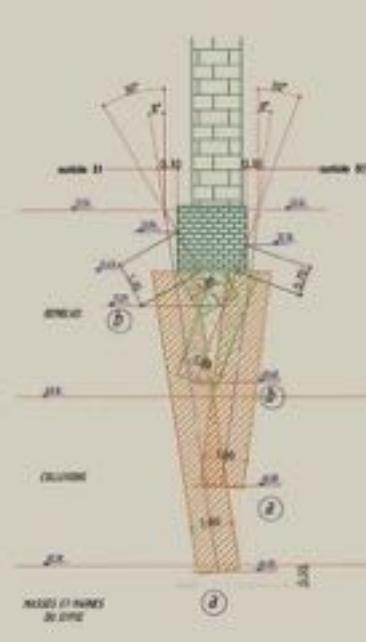
COUPE TYPE
des colonnes de jet grouting sous un mur



8

© SOLETANCHE BACHY

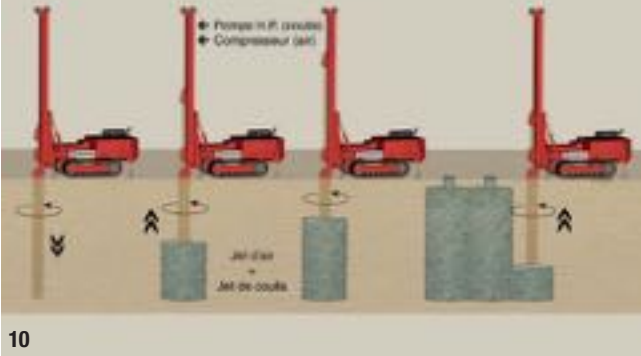
COUPE TYPE
des colonnes de jet grouting sous un poteau



9

© SOLETANCHE BACHY

PRINCIPE DU JET GROUTING



10

© SOLETANCHE BACHY

DIFFÉRENTS TYPES DE JET GROUTING



11

© SOLETANCHE BACHY

LE JET GROUTING POUR LES NULS

Le procédé de jet grouting consiste à déstructurer le terrain en profondeur à l'aide d'un jet fluide haute pression (classiquement de 20 à 40 MPa) dans un forage, puis à mélanger le sol érodé avec un coulis liquide autodurcissant afin de former des colonnes, panneaux et autres structures dans le terrain (figure 10). Le matériau résultant de ce mélange se caractérise par une substitution plus ou moins importante du sol en place, dépendant de la géologie (nature, granulométrie, composition, compacité) et de la technique utilisée (jet simple, double ou triple), mais aussi de l'objectif à atteindre (diamètre, composition, résistance des colonnes).

Dans les terrains granulaires, le jet à haute énergie cinétique disperse les grains par érosion, alors que dans un sol cohérent, il découpe des morceaux plus ou moins gros d'argile. Dans la pratique, un forage de 100 à 200 mm est exécuté sur la hauteur à traiter, le jet de fluide étant ensuite envoyé par une pompe haute pression à travers une ou plusieurs buses de faible section (diamètre de 1 à 10 mm) placées sur un moniteur au pied d'un train de tiges de 70 à 100 mm de diamètre. La tige, mise en rotation, est ensuite remontée lentement afin de former la colonne.

Durant la phase de jet, les volumes en excès du mélange sol-ciment (appelés rejets ou spoil) doivent ressortir librement en tête de forage - l'excès de matériau risquant de « claquer » le terrain et de créer des désordres au voisinage - puis être évacués du chantier au fur et à mesure de l'avancement. Dans le procédé à double jet, le jet de coulis est entouré par un jet d'air annulaire qui crée un cône enveloppant et augmentant le rayon d'action : l'ensemble améliore les possibilités d'extraction. En jet triple, les fonctions déstructuration et extraction du terrain sont obtenues par un jet double d'eau et d'air, l'incorporation du liant étant assurée par un jet de coulis envoyé simultanément à basse pression (quelques MPa) par une buse inférieure (figure 11).

Le procédé de jet grouting s'applique à tous les terrains meubles ou au rocher tendre, principalement en consolidation et, sous certaines conditions, en étanchéité : reprise en sous-œuvre de bâtiments, coupure étanche de barrage, soutènement de fouilles, voûte parapluie pour tunnel avec consolidation éventuelles en piédroits, voile de consolidation pour quais...

10- Principe du jet grouting.

11- Différents types de jet grouting.

12- Foreuse compacte.

13- Centrale de fabrication du coulis et d'injection haute pression.

10- Jet grouting schematic.

11- Various types of jet grouting.

12- Compact drilller.

13- Grout production and high-pressure injection plant.

Précisons que, par crainte de la destruction des vestiges archéologiques enfouis, essentiellement par des remplissages dus au coulis de jet grouting, les travaux de consolidation furent précédés d'une importante campagne de fouilles archéologiques extensives. Ces investigations ont permis de mettre à jour les anciennes dispositions de l'édifice, de mieux les comprendre et de récupérer tout le mobilier funéraire et les autres objets qui avaient été mis en terre. Dans la pratique, les travaux ont été exécutés au moyen d'une machine compacte Beretta T46 (figure 12), compatible avec les contraintes majeures du chantier, à savoir les difficultés d'accès et l'exiguïté du site. À titre d'exemple, les bracons métalliques extérieurs et l'étroitesse de la porte d'entrée interdisaient de faire pénétrer l'engin dans la zone correspondant à l'ancienne sacristie. De ce fait, l'engin a été gruté à travers la toiture, préalablement déposée avant restauration. La centrale de fabrication et d'injection (170 bars) du coulis était également de conception compacte, avec deux silos horizontaux de 25 t empilés en partie supérieure (figure 13). Autre difficulté : la gestion du spoil.



12

© GÉRIC HELSLEY POUR SOLETANCHE BACHY

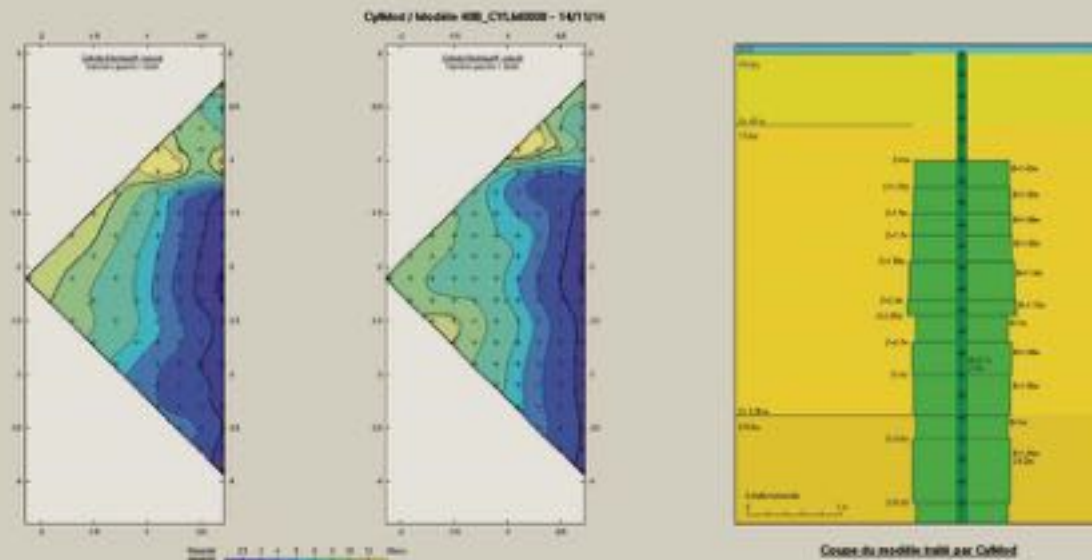


13

© GÉRIC HELSLEY POUR SOLETANCHE BACHY

PLANCHE CYLJET SUR UNE COLONNE :

à gauche la colonne mesurée, au centre la colonne modélisée, à droite l'analyse avec les diamètres retenus



14

© SOLDATA

LE CYLJET® CONTRÔLE LES COLONNES

Les techniques mécaniques traditionnelles, conçues pour vérifier les paramètres d'exécution d'une colonne de jet grouting ont, outre des difficultés purement pratiques dues à l'utilisation de bras palpeurs mécaniques, très vite montré leurs limites en termes de précision des mesures.

La méthode d'évaluation brevetée Cyljet®, mise au point par Soldata Geophisic, est une technique de super diagraphie capable de pallier ces problèmes, via la possibilité d'évaluer, *in situ*, le diamètre des colonnes de jet avec une précision de 10%.

Cette solution d'investigation repose sur l'utilisation du procédé « Cylindre Électrique » qui permet d'obtenir une auscultation électrique d'un cylindre de 8 à 10 m autour d'un forage, suivant la résistivité des terrains.

Elle consiste à disposer, à l'intérieur d'un forage, un câble multiconducteur comprenant des électrodes d'émission intercalées avec des électrodes de réception, réparties régulièrement.

Une différence de potentiel est ensuite générée entre un point de référence éloigné et chacune des électrodes de réception qui sont successivement interrogées ; les différences de résistivité mesurées permettent alors différentes applications, telles la recherche d'anomalies ponctuelles, la reconnaissance à l'avancement d'un tunnel, la localisation de pollutions, le contrôle de l'injection, etc.

Cette technique, appliquée aux colonnes de jet grouting, permet de déterminer la limite entre le terrain en place et le matériau de jet.

L'interprétation des mesures s'effectue par l'intermédiaire d'un logiciel spécifique et utilise la méthode d'inversion.

Dans la pratique, un tube PVC crépiné abritant les électrodes est descendu dans la colonne fraîche, jusqu'à 2 à 3 m sous sa base, lorsque la longueur de celle-ci n'excède pas une dizaine de mètres depuis la surface.

Pour des profondeurs supérieures, il faut attendre une courte période de séchage avant de procéder à un carottage de la colonne en vue d'introduire le tube.

Par comparaison avec les mesures préliminaires, qui ont servi à définir les résistivités du sol en place, il est alors possible de définir la géométrie de la colonne : le béton de sol réalisé a en effet une résistivité très basse par rapport aux sols habituels.

La méthode a déjà permis de mesurer 1 400 colonnes sur plus d'une centaine de chantiers.

14- Planche Cyljet sur une colonne : à gauche la colonne mesurée, au centre la colonne modélisée, à droite l'analyse avec les diamètres retenus.

15- Évacuation du spoil stocké dans des bacs.

14- Cyljet logging on a column: on the left the measured column, in the center the modeled column, on the right the analysis with the diameters adopted.

15- Removal of the spoil stored in containers.

UN PHASAGE ÉVOLUTIF

La nature fortement argileuse du terrain expliquait, qu'en effet, le taux de substitution du terrain était proche de 100% avec, en conséquence, d'importants volumes à évacuer quotidiennement - une colonne de 10 m générant environ 12 m³ de « spoil » - le matériau résiduel se caractérisant par une prise assez rapide. La pelle mécanique qui assurait le chargement des camions avait - toujours pour illustrer l'exiguïté du site - terrassé sa propre rampe d'accès afin d'atteindre la plateforme de travail, le stockage du spoil étant réalisé dans une cuve constituée de murs préfabriqués en L (figure 15).

Quant aux travaux eux-mêmes, ils se sont déroulés de l'intérieur vers l'extérieur, la proximité de certaines sépul-



15

© GÉRIE HELSLEY POUR SOLETANCHE BACHY



16



17

tures interdisant notamment toute possibilité d'intervenir, côté extérieur, sur la façade est. À noter que le cimetière paroissial abrite des tombes de célébrités, entre autres celle de l'épouse d'André Malraux et celle de Robert Brasillach.

Durant la première phase, à l'intérieur donc, les forages se sont déroulés en ajustant le planning en fonction des réactions du bâtiment : celui-ci, toujours très sensible et fragile, était ausculté en permanence par des capteurs de mouvements reliés à une centrale de recueil des données.

Les travaux ont été menés en pianotant sur trois zones distinctes (figure 16) ; il s'avérait parfois nécessaire de revenir sur un même point, chacun d'eux comportant en effet 2 à 4 colonnes. Des carottages préalables ont, par

ailleurs, dû être exécutés pour certaines colonnes afin de traverser, sans les fragiliser, les fondations existantes. La machine a ensuite été transférée en extérieur, puis rapatriée une dernière fois à l'intérieur, afin de réaliser le solde

des colonnes, sous les six poteaux existants et sur une partie de la façade sud-est.

Il s'agissait, en effet, de la zone où avait été construite la charpente boisée lors des travaux de sécurisation (figure 17).

Celle-ci avait, bien entendu, été démontée au dernier moment, une fois le bâtiment renforcé au maximum. À noter que des interventions sur les superstructures étaient prévues pour accompagner cette phase de travaux confortatifs en gommant les conséquences esthétiques et structurelles des désordres. Les réseaux de recueil des eaux, très fuyards, seront par ailleurs entièrement repris, ainsi que les sols extérieurs et intérieurs.

Dans l'église, seule une « mise en propreté » des intérieurs sera réalisée, d'importants travaux ayant été déjà effectués entre les deux guerres.

Il ne s'agissait donc pas, à proprement parler, d'une restauration mais d'une remise en état de ce petit édifice au cachet si peu parisien. Quant au mur de soutènement du cimetière, il a été remis à neuf. Reconstitué en béton armé (50 cm d'épaisseur), il est à présent fondé sur une semelle en L reposant sur une quarantaine de micropieux ancrés à 12 m de profondeur (diamètre 88,9 mm). Il est doublé par un parement en meulière de récupération pour les parties visibles. □

16- Forage à l'intérieur de l'église.

17- Charpente boisée.

16- Drilling inside the church.

17- Wooden structure.

FICHE TECHNIQUE

PROPRIÉTAIRE : Mairie de Paris - Direction des Affaires Culturelles

MAÎTRE D'OUVRAGE : DAC Sous-Direction du Patrimoine et de l'Histoire / Département des Édifices Culturels et Historiques

MAÎTRE D'ŒUVRE : Jean-François Lagneau, Architecte en Chef des Monuments Historiques

COORDONNATEUR SPS : Tilalys Architectes

BUREAU DE CONTRÔLE TECHNIQUE : Preventec

BUREAU D'ÉTUDES GÉOTECHNIQUES : Botte Sondages

ENTREPRISES : Groupement Degaine / Soletanche Bachy

ABSTRACT

JET GROUTING FOR AN ENDANGERED MONUMENT AT SAINT-GERMAIN DE CHARONNE

ROBERT PORET, SOLETANCHE BACHY - JEAN-FRANÇOIS LAGNEAU

Saint-Germain de Charonne church, in the heart of the village of Charonne in the 20th arrondissement of Paris, is an historic monument built between the 15th and 18th centuries. This building, located on the southern face of a very steep hillside, has a structural history which testifies to chronic instability. Recurrent consolidation works have always been necessary. Closed to the public since December 2009, after the appearance of large cracks, the building is now undergoing a consolidation project designed to save it from certain collapse. The works involve re-establishing the church on sound supports by looking for the geological layer having the best load-bearing capacity at a depth of about ten metres. Underpinning is performed using the jet grouting process. The 190 columns executed (diameters 0.80 and 1 m) allow firm supports to be created under the existing masonries. □

JET-GROUTING PARA MONUMENTO EN PELIGRO EN SAINT-GERMAIN DE CHARONNE

ROBERT PORET, SOLETANCHE BACHY - JEAN-FRANÇOIS LAGNEAU

La iglesia de Saint-Germain de Charonne, situada en el centro del pueblo de Charonne, en el distrito XX de París, es un monumento histórico construido entre los siglos XV y XVIII. Este edificio, implantado en el lado sur de una ladera muy escarpada, tiene una historia estructural que atestigua una inestabilidad crónica. Siempre ha sido necesario realizar obras de consolidación recurrentes. Cerrado al público desde diciembre de 2009 debido a la aparición de importantes grietas, actualmente el edificio es objeto de un proyecto de consolidación destinado a salvarlo de una ruina segura. Las obras consisten en reasentar la iglesia sobre apoyos adecuados buscando la capa geológica con mayor capacidad de sustentación a unos diez metros de profundidad. El recalce de cimientos se efectúa según el procedimiento de jet grouting. Las 190 columnas realizadas (diámetro 0,80 y 1 m) permiten crear sólidos apoyos bajo las obras de fábrica existentes. □



LE RÉAMÉNAGEMENT DES VOIRIES SOUTERRAINES DES HALLES À PARIS

AUTEURS : EMMANUEL CHEVALLIER, RESPONSABLE DU PÔLE OUVRAGES DE SUPERSTRUCTURES, ISC (VINCI CONSTRUCTION FRANCE) - WILLIAM TSOPNANG, CHEF DE PROJETS ADJOINT ISC (VINCI CONSTRUCTION FRANCE) - GREGORY SMITH, DIRECTEUR TRAVAUX, GTM TP IDF (VINCI CONSTRUCTION FRANCE) - PHILIPPE LABORIE, DIRECTEUR TRAVAUX, GTM TP IDF (VINCI CONSTRUCTION FRANCE)

LA RESTRUCTURATION DES VOIRIES SOUTERRAINES DES HALLES S'INSCRIT DANS LE PROJET GLOBAL DE RÉAMÉNAGEMENT DU SITE DES HALLES À PARIS. CE PROJET MÉCONNU DU GRAND PUBLIC EST POURTANT INDISPENSABLE POUR LE BON FONCTIONNEMENT DU SITE. LES VOIRIES SOUTERRAINES PERMETTENT L'ACCÈS AUX 7 PARKINGS DU SITE ET AUX 3 AIRES DE LIVRAISON DU CENTRE COMMERCIAL. LES VOIRIES, VIEILLES DE 30 ANS, DOIVENT ÊTRE RESTRUCTURÉES ET MODERNISÉES AFIN DE GARANTIR LA SÉCURITÉ DU CŒUR DE LA CAPITALE. LES TRAVAUX CONSISTENT À DIMINUER LE TRANSIT ROUTIER SOUTERRAIN ET METTRE AUX NORMES LES KILOMÈTRES DE VOIRIES CONSERVÉES.

LE SITE DES HALLES

Au cœur de Paris, le site des Halles, c'est plus de sept niveaux de planchers, dont cinq niveaux souterrains. Il associe un pôle de transports en commun assurant l'interconnexion de 3 lignes RER et 4 lignes de métro et

formant l'une des plus importantes gares européennes, un centre commercial de 60 000 m², parmi les plus dynamiques de l'agglomération parisienne et un ensemble d'équipements publics à caractère sportif et culturel. Il est desservi par un ensemble de voies

souterraines assurant une fonction de transit entre différents points des 1^{er} et 4^e arrondissements permettant l'approvisionnement du pôle commercial, l'accès des moyens de secours et la desserte de 2 000 places de stationnement.

LE PROJET GLOBAL : LE RÉAMÉNAGEMENT DES HALLES DE PARIS

30 ans après la mise en service du site, le taux de fréquentation grandissant, le vieillissement des structures et l'évolution des normes de sécurité imposent



LES VOIRIES SOUTERRAINES DES HALLES (VSH) AVANT TRAVAUX



2

© SEURA

1- Ouvrage Marguerite de Navarre - Bétonnage de la dalle de couverture de la nouvelle rampe B2.

2- Les Voiries Souterraines des Halles (VSH) avant travaux.

3- Numérotation des voies.

1- Marguerite de Navarre structure - Concreting the cover slab of the new B2 ramp.

2- Les Halles underground road system (VSH) before works.

3- Road numbering.

tion de bungalows commun à l'ensemble les chantiers) ;

→ Construction de la Canopée + restructuration des circulations verticales ;

→ La restructuration des VSH (Voiries Souterraines des Halles) ;

→ La restructuration du pôle de transport en commun Châtelet-les-Halles.

Ainsi ces travaux rendront ce site plus accueillant, vivant et dynamique. Tous les jours, ce sont 750 000 voyageurs

et 150 000 clients qui verront leur quotidien amélioré. Ces marchés majeurs relèvent de deux maîtrises d'ouvrage : la RATP pour la restructuration du pôle de transport en commun et la SemParisSeine pour les autres marchés.

Les travaux de réalisation de ces 4 marchés ont été confiés au groupement d'entreprises de Vinci Construction France comprenant GTM TP IdF, Chantiers Modernes Construction et TPI. Les études de structures et méthodes, ont été réalisées intégra-

lement réalisé par ISC (Ingénierie des Structures et des Chantiers), filiale ingénierie de Vinci Construction France pour les projets de restructuration des VSH et du pôle transport en commun.

LES VOIRIES SOUTERRAINES DES HALLES

Actuellement, les voiries souterraines des Halles représentent plus de 4 km de voies routières assurant 3 fonctions. Elles permettent le transit routier au travers des Halles, s'inscrivant dans la continuité du réseau routier de la capitale. Elles permettent également l'accès logistique aux 3 aires de livraison principales permettant le bon approvisionnement et fonctionnement du site. Enfin, ce réseau souterrain permet aux automobilistes d'accéder aux 7 parkings souterrains du site (figure 2). La voirie souterraine des Halles comporte actuellement (figure 3) :

→ Une bretelle de sortie vers la rue du Renard (voie n°1 - mise en service en 1977) ;

→ Un axe nord-sud de la rue de Turbigo à la rue des Halles mis en service en 1977 (voie n°5) ;

→ Une boucle de petit diamètre permettant la sortie du parc de stationnement Berger et desservant les installations du PC police voirie mise en service en 1979 (voie n°15) ;

© GRONTMIJ

NUMÉROTATION DES VOIES



3

une restructuration et une modernisation du site qui n'est plus adapté à son utilisation aujourd'hui.

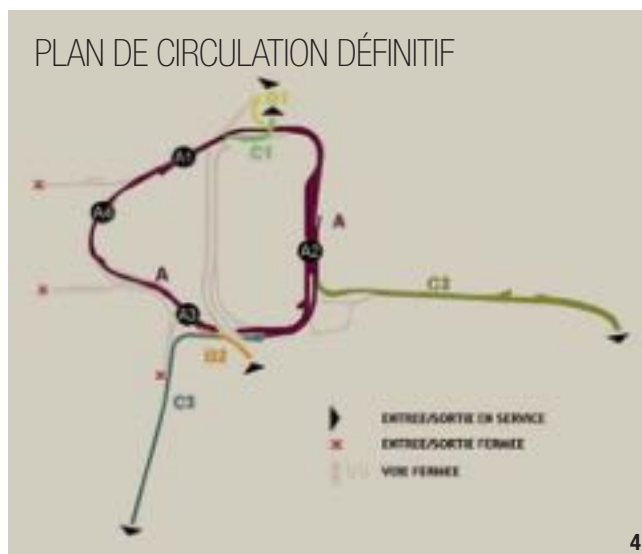
Le projet de restructuration est composé de 4 marchés travaux majeurs :

→ La cité de chantier (aménagement des jardins actuels pour l'installa-

- Une boucle intérieure autour du niveau -2 du forum des Halles, mise en service en 1979 (voies n°3, 4 et 11) ;
- Une bretelle d'entrée depuis la rue Coquillière, mise en service en 1980 (voie n°9) ;
- Une bretelle de sortie vers la rue du Louvre mise en service en 1980 (bretelle de la voie n°3) ;
- Une bretelle de sortie vers le Pont Neuf mise en service en 1982 (voie n°6) ;
- Une boucle ouest : entrée rue du Pont Neuf et sortie rue Mondétour, mise en service en 1984 (voie n°7).

Ces voies desservent les aires de livraison du Forum pouvant accueillir des poids lourds :

- L'aire nord desservie par la voie n°4 ;
 - L'aire sud avec accès par la voie n°3 et sortie par la voie n°11 ;
 - L'aire ouest avec accès par la voie n°10 et sortie par la voie n°7 ;
- Ces voies permettent également de rejoindre des parcs de stationnement de véhicules :
- Le parc du centre Georges Pompidou accessible aux PL ;
 - Le parc Rambuteau ;
 - Le parc Berger ;
 - Le parc St-Eustache ;
 - Le parc Sébastopol-Halles (sortie uniquement) ;
 - Le parc RIVP Immeuble Rambuteau.



Ces voiries routières sont situées au-dessus des niveaux du réseau RATP, c'est-à-dire que, structurellement, ces voiries sont portées par une ossature béton composée de poteaux, de poutres-voiles en béton armé ou précontraint, de planchers béton reprenant les charges routières tel un pont.

Le projet de restructuration des VSH (figure 4) consiste, d'une part, à réduire le nombre de voies circulées (parfois au profit d'espaces commerciaux augmentés) et, d'autre part,

4- Plan de circulation définitif.

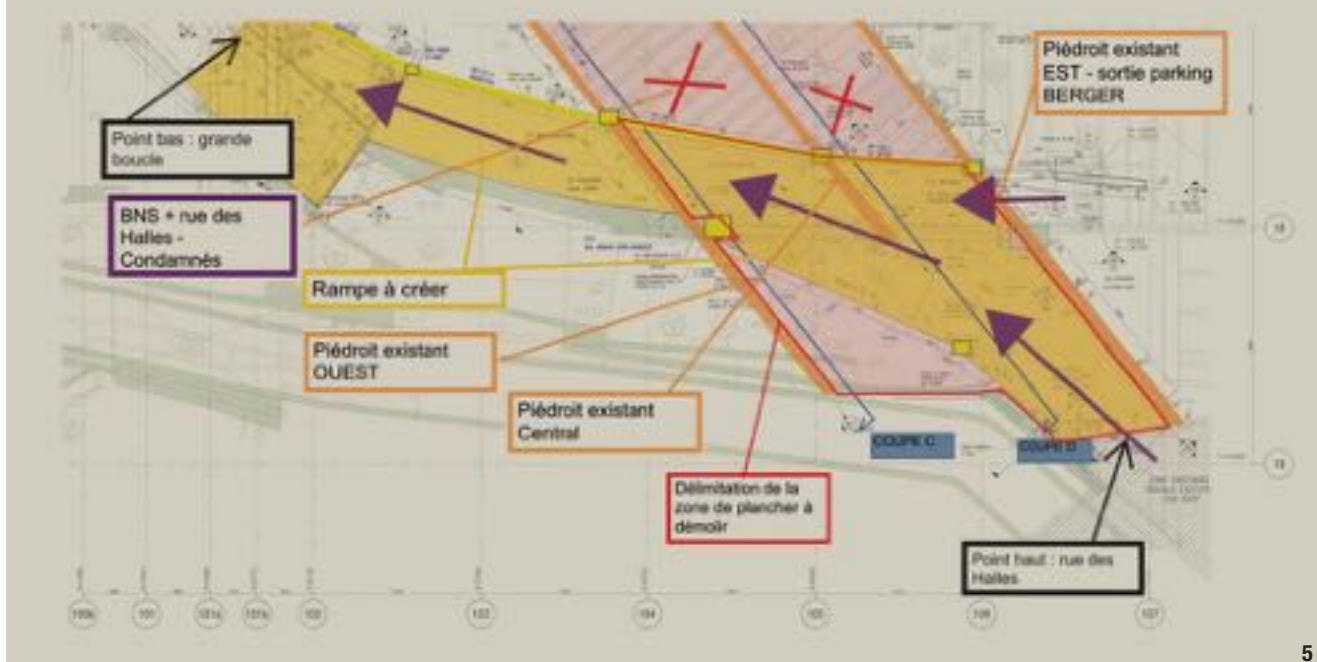
5- Ouvrage Marguerite de Navarre - Vue en plan de la nouvelle rampe B2.

4- Final traffic plan.
5- Marguerite de Navarre structure - Plan view of the new B2 ramp.

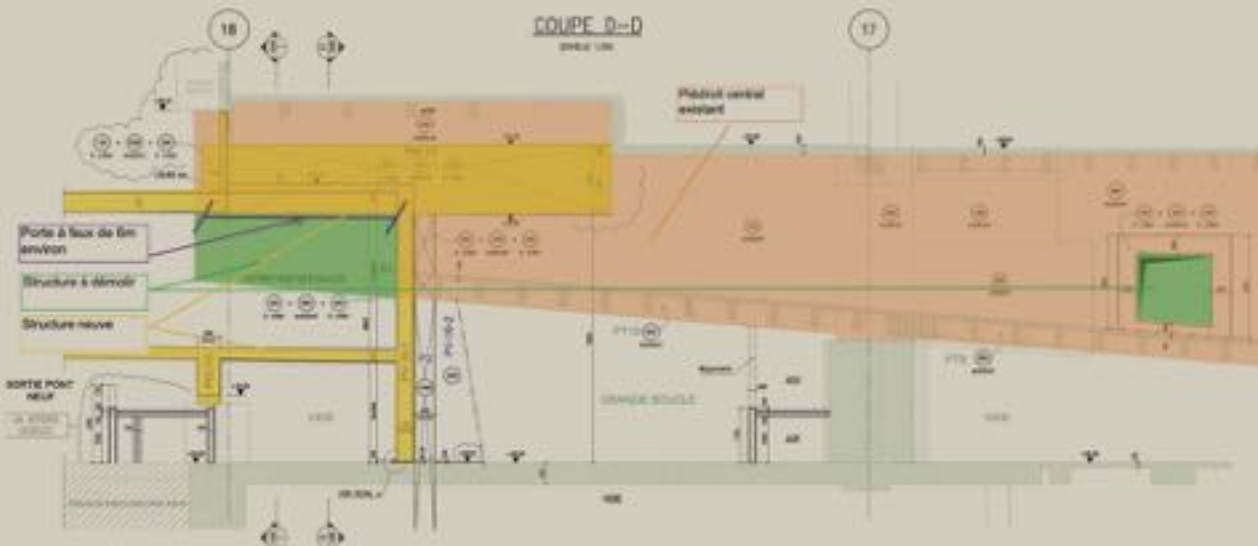
à mettre aux normes de « sécurité tunnels » les voiries souterraines conservées (création d'issue de secours (IS), système d'aération et d'alerte, tenue au feu des ouvrages). Il s'agit de travaux de démolition lourde, de travaux de renforcement de structures existantes par des structures en béton armé et en charpente métallique, de travaux de terrassement, de la réalisation des fondations (semelles superficielles et micropieux), de la réalisation de structures neuves en béton armé et en charpente métallique, de la réalisation des maçonneries, des travaux de protection au feu, de la réalisation de tunnels et de puits. Les conséquences principales de ces travaux sont (hormis la sécurisation des voiries) :

- La suppression de l'axe Nord-Sud (voie n°5) ;
- La suppression de la bretelle d'entrée depuis la rue Coquillière (voie n°9) ;
- La suppression de la bretelle de sortie vers la rue du Louvre (voie n°3 partiellement) ;
- La suppression de l'entrée rue du Pont Neuf (voie n°7 partiellement) ;
- La suppression de la petite boucle (voies n°4 et n°11) ;
- La reconfiguration de la trémie d'entrée rue des Halles afin de permettre un accès direct à la grande boucle depuis le sud ;

OUVRAGE MARGUERITE DE NAVARRE - VUE EN PLAN DE LA NOUVELLE RAMPE B2



OUVRAGE MARGUERITE DE NAVARRE - COUPE D SUR LE PIÉDROIT CENTRAL



6

OUVRAGE MARGUERITE DE NAVARRE - COUPE C SUR LE PIÉDROIT OUEST



7

→ La reconfiguration de la trémie de sortie rue du Renard.

Ainsi, les voiries souterraines composeront (figure 4) :

→ Une voie formant une boucle (voies A1, A2, A3, A4) avec la voie A3 permettant l'accès à l'aire de livraison Sud, et la voie A4 permettant l'accès à l'aire de livraison Ouest et Medicis ;

→ Une voie d'entrée depuis la rue des Halles (voie B2) ;

→ Une voie d'entrée depuis la rue de Turbigo (voie B1) permettant l'accès à l'aire de livraison Nord ;

→ Une voie de sortie vers la rue Mondétour (voie C1) ;

6- Ouvrage Marguerite de Navarre - Coupe D sur le piedroit Central.

7- Ouvrage Marguerite de Navarre - Coupe C sur le piedroit Ouest.

6- Marguerite de Navarre structure - Cross section D on the Central wing wall.

7- Marguerite de Navarre structure - Cross section C on the West wing wall.

→ Une voie de sortie vers la rue du Renard (voie C2) ;

→ Une voie de sortie vers la rue Pont Neuf (voie C3).

Ces voies permettent également de desservir des parcs de stationnement de véhicules :

→ Le parc Rambuteau (voies B1, A2) ;

→ Le parc St-Eustache (voies B2, A1) ;

→ Le parc Berger (voies A2, C1) ;

→ Le parc RIVP immeuble Rambuteau (voies A4, C1) ;

→ Le parc Sébastopol les Halles (uniquement en sortie) (voie C2) ;

→ Le parc du centre Georges Pompidou (voie C2) ;

→ Le parc hôtel Novotel (voie B2).

L'OUVRAGE « MARGUERITE DE NAVARRE »

Cet ouvrage est le plus complexe du projet des restructurations des VSH. Il consiste à dévier l'actuelle voie « entrée rue des Halles » (voie n°4 actuelle qui permet d'aller du Sud vers le Nord, figure 3), en créant une rampe pour rejoindre la « grande boucle » qui est 2,50 m plus bas environ et notamment les voies actuelles n°3, 10 et 7. Est ainsi créée la nouvelle voie B2 (figures 4 et 5).

Également, dans cette zone, la sortie du parking Berger est modifiée et sera désormais du côté de cette nouvelle rampe à créer. ▷



8 © ISC

8- Ouvrage Marguerite de Navarre - Nouvelle rampe B2 à fin décembre 2012.

9- Ouvrage Marguerite de Navarre - Nouvelle rampe B2 vue depuis la petite boucle.

8- Marguerite de Navarre structure - New B2 ramp at end-December 2012.

9- Marguerite de Navarre structure - New B2 ramp seen from the small loop.



9 © ISC

Le barreau Nord-Sud (BNS) + rue des Halles est une structure en double caisson constituée de 3 piédroits (Ouest, Central et Est), un plancher inférieur de roulement et une dalle de couverture.

Pour « descendre » de la rue des Halles vers la grande boucle, il faut :

→ En démolition :

- Démolir les planchers inférieur et supérieur (dont une poutre exis-

tante de 1,7 m x 1,6 m sur 17 m de portée) (figure 5) ;

- Démolir partiellement les piédroits Est, Ouest et Central (figures 6 et 7) ;

→ En structures neuves :

- Renforcer les piédroits (figures 6 et 7) ;
- Créer les poteaux + appareils d'appuis ;
- Créer les nouvelles poutres ;

- Créer les nouveaux planchers : dalle inférieure + dalle de couverture ;
- Créer les poutres-voiles qui ferment la nouvelle rampe.

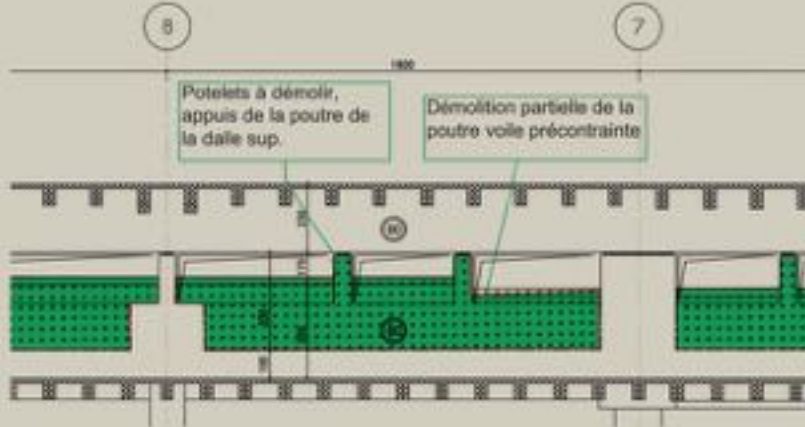
Du fait de la démolition des poutres-voiles existantes porteuses dont une partie de la structure est conservée, le phasage d'exécution est phasé entre le renforcement de l'existant et la réalisation de la structure neuve.

LA RECONVERSION DU BNS (BARREAU NORD-SUD)

Le BNS est intégralement reconverti. C'est ainsi plus de 110 m de voiries (voies V4 et V5, figures 2 et 3) qui sont fermées à la circulation routière au profit d'espaces commerciaux. Les véhicules circulaient à l'intérieur d'un double caisson qui portait entre les poteaux du forum, espacés tous les 16 m.

RECONVERSION DU BNS - ÉLÉVATION DU PIÉDROIT CENTRALE

Ouvertures à réaliser



© BC 10

Pour permettre la libre circulation des futurs utilisateurs de ces commerces, il est prévu de créer de grandes ouvertures dans la poutre-voile centrale file 103 (figure 10).

La démolition a un double impact : d'une part les potelets qui soutiennent la poutre de la dalle supérieure sont à démolir : il faut donc renforcer cette poutre pour qu'elle puisse porter sur 16 m au lieu de 5 m actuellement

(coupe type, figure 11). La structure existante est moisée par des renforts en béton armé (liaison du neuf avec l'existant par scellement). Les renforts en béton armé sont dimensionnés pour reprendre la totalité des efforts.

Les poteaux espacés tous les 16 m reprennent également plus de charge du fait de la suppression des potelets intermédiaires, ils sont renforcés par moisage également (figures 11 et 12).

10- Reconversion du BNS - Élévation du piedroit centrale - Ouvertures à réaliser.

11- Reconversion du BNS - Renforcement de la file 103 - coupe type.

12- Reconversion du BNS - Renforcement des poteaux.

10- Redevelopment of the BNS - Elevation of central column - Openings to be executed.

11- Redevelopment of the BNS - Strengthening row 103 - typical section.

12- Redevelopment of the BNS - Strengthening the pillars.

D'autre part, la démolition partielle du voile engendre une perte d'inertie de la poutre et oblige la suppression de plusieurs câbles précontraints. Car la poutre-voile de la file 103 est une poutre en béton précontraint par post tension qui a maintenant plus de 30 ans d'âge.

Le renforcement de la poutre-voile se fait par l'ajout de précontrainte qui moisie la structure existante, voir le schéma de câblage (figure 13).

LES GAINES DE VENTILATION, LES ISSUES DE SECOURS, LES NICHES DE SÉCURITÉ

Le projet de restructuration des VSH inclut également la mise aux normes des sécurités des voiries conservées. En plus des plaques de protection de la structure face au feu, ce sont des kilomètres de gaines techniques qui sont réalisés.

Ces gaines techniques servent à compartimenter les différentes gaines de ventilation, les issues de secours et les niches de sécurité.

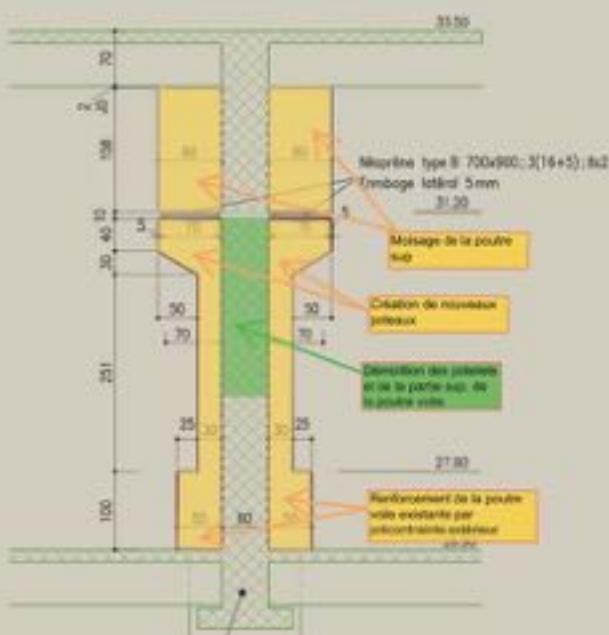
Elles sont traitées au cas par cas suivant la composition structurelle de la voirie considérée.

Dans tous les cas, elles doivent avoir la capacité de résister à un choc de voiture. Il s'agit donc d'une structure en béton armé de 1,50 m de haut minimum, surmontée d'un mur maçonnerie. Suivant les normes en vigueur, ce linéaire de gaine est ponctué par les issues de secours et les niches de sécurité.

Les issues de secours permettent l'évacuation des utilisateurs des voiries vers la surface, d'où une interface importante avec les projets en surface pour s'assurer de la cohérence des circulations verticales entre différents marchés (notamment avec le projet Canopée). ▷

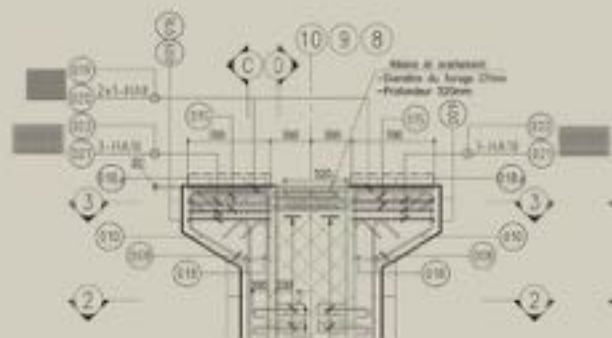
RECONVERSION DU BNS - RENFORCEMENT DE LA FILE 103

Coupe type



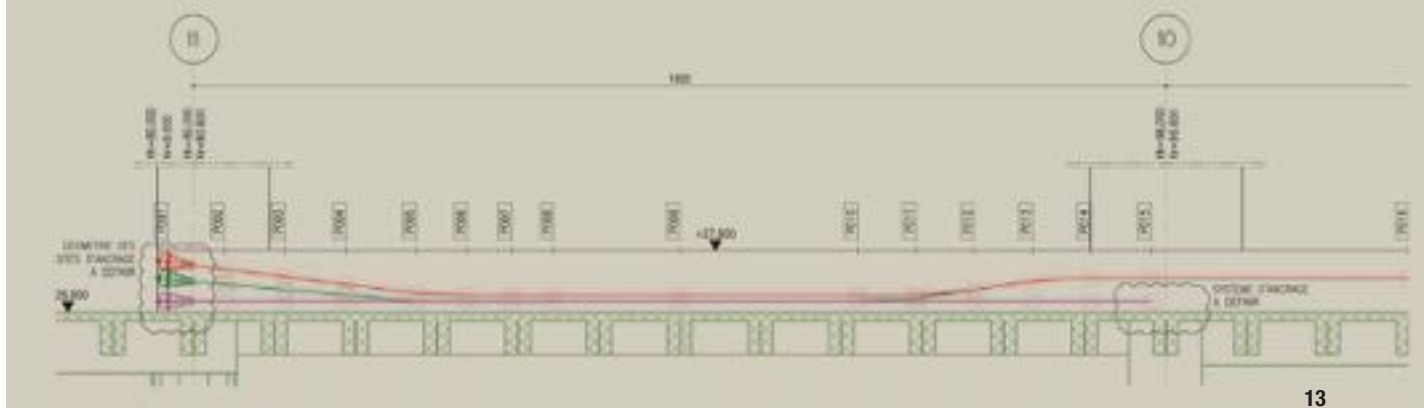
© BC 11

RECONVERSION DU BNS - RENFORCEMENT DES POTEAUX



12

RECONVERSION DU BNS - PRÉCONTRAINTE EXTÉRIEUR - SCHÉMA DE CÂBLAGE



13

© ISC

LES CONTRAINTES D'UN TEL PROJET

La restructuration des VSH est un projet complexe car c'est un chantier de réhabilitation lourde où les travaux à réaliser sont tributaires de l'existant. Mais plusieurs éléments majeurs amplifient la complexité de ce projet particulier :

- Des structures existantes qui ont plus de 30 ans et dont une grande partie est enterrée.
- Un site très étendu, avec maintien en exploitation de l'activité (commerces, équipements culturels, pôle de transport en commun RER et métro). Outre le fait de maintenir l'accès aux usagers, cela implique

également le respect des réglementations et normes de sécurité pour les ERP et cela pendant chacune des phases travaux.

- Un chantier au cœur de la capitale : problématiques et contraintes liées au maintien du confort des riverains et des usagers (accès chantier, gestion des approvisionnements, gestion des nuisances telles que le bruit et la poussière, etc.)
- L'imbrication des différents projets avec des maîtrises d'œuvre différentes sur un site commun, des interventions concomitantes ou enchaînées sur des mêmes secteurs. Une organisation et une logistique

13- Reconversion du BNS - Précontrainte extérieure - schéma de câblage.

14- Plan de circulation phase 1.

15- Plan de circulation phase 2.

13- Redevelopment of the BNS - External prestressing - cabling diagram.

14- Traffic plan phase 1.

15- Traffic plan phase 2.

de chantier à maîtriser : le phasage des travaux et des livraisons.

- La gestion d'un grand nombre d'intervenants, aussi bien institutionnels qu'opérationnels.
- Des natures de travaux différentes : réhabilitation, travaux neufs, travaux de bâtiments, travaux de voirie.

LES PLANS DE CIRCULATION EN PHASE TRAVAUX

5 plans de circulation sont nécessaires pour la réalisation des travaux tout en maintenant les voiries partiellement en service :

- Plan de circulation A, phase 1 : 85 jours (17/05/11 au 19/09/11).

PLAN DE CIRCULATION PHASE 1

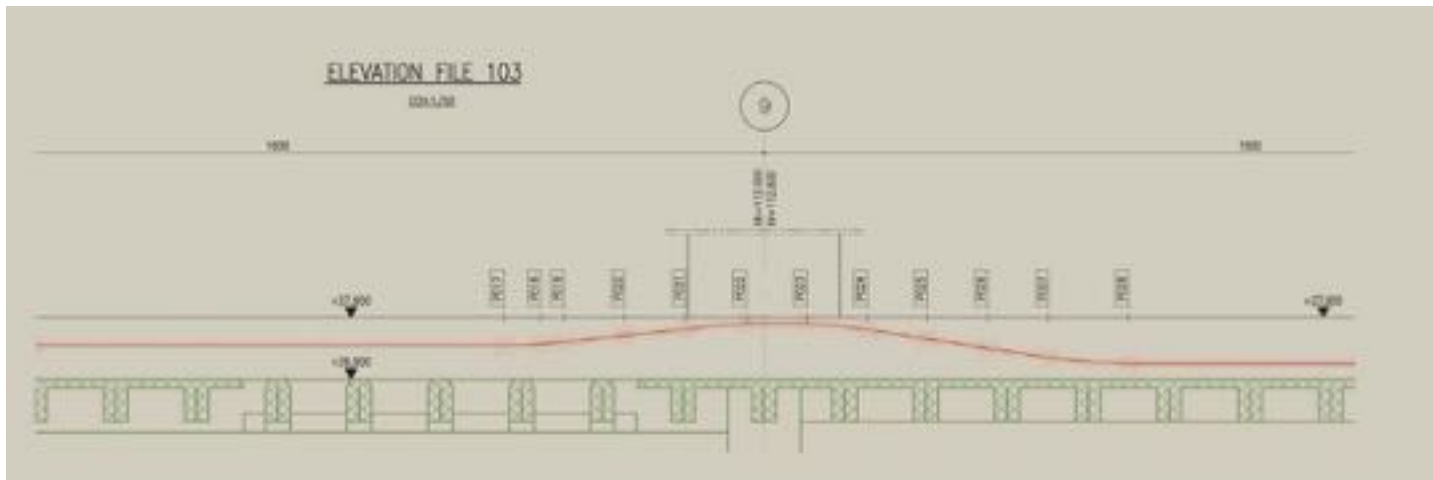


14

PLAN DE CIRCULATION PHASE 2



15



→ Plan de circulation B phase 1 : 760 jours (19/09/11 au 30/10/14).
 → Plan de circulation C phase 2 : 190 jours (30/10/14 au 18/08/15) Phase 2 bis et phase 3.
 → Plan de circulation D phase 2 : 160 jours (18/08/15 au 08/04/16).
 Durant les travaux dans les VSH, le tunnel reste ouvert à la circulation et les aires de livraison sont maintenues en fonctionnement. De ce fait, les travaux suivent un phasage très précis et sont calés sur plusieurs plans de circulations (emprise de chantier sur la voirie, modification de circulation, etc.). Le tunnel et les aires de livraison étant toujours en fonctionnement,

tous les organes de sécurité doivent être opérationnels (bornes incendie, issues de secours, ventilation, etc.) durant toutes les opérations. Depuis le 30 octobre 2014, et après 3 ans de travaux, le chantier des VSH a changé de plan circulation, nous sommes passés de la phase 1 à la phase 2 (figures 14 et 15). Ce basculement a pour but de rouvrir à la circulation un tronçon de 300 m complètement réhabilité (partie sud de la grande boucle) et de fermer définitivement le BNS afin d'y réaliser les travaux de précontrainte, d'une part, et la création de 3 500 m² de surfaces commerciales, d'autre part. □

RÉCAPITULATIF DES DONNÉES PRINCIPALES DE L'OUVRAGE

O.S. DE DÉMARRAGE DES TRAVAUX : 01/04/11
DÉLAI DE RÉALISATION DES TRAVAUX : 5,5 ans
LIVRAISON SELON PLA 0015L : 08/03/16
POIDS TOTAL DES ACIERS (HA + TS) : 280 t
VOLUME TOTAL DE BÉTON : 3800 m³

INTERVENANTS DE L'OUVRAGE

MAÎTRE D'OUVRAGE : SemPariSeine

GROUPEMENT MAÎTRISE D'ŒUVRE : Ginger Sechaud Bossuyt

GROUPEMENT D'ENTREPRISES

- **Génie Civil : Gtm TP IDF (Mandataire) ; Sogea TPI ; Chantiers Modernes Construction**
- **Équipementier : Sdel ; Cegelec**
- **VRD : Eurovia**

PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS DU GROUPEMENT GC :

- **Entreprise sous-traitante études d'exécution structures et méthodes génie civil : ISC (Vinci Construction France)**
- **Entreprise sous-traitante Protection Feu : Groupement Freyssinet / POA / IFS (Vinci Construction France)**
- **Entreprise sous-traitante Démolition : Delair CFD (Vinci Construction France)**
- **Entreprise sous-traitante Serrurerie : Idf Métallerie / Saml / Gesop**
- **Entreprise sous-traitante Plomberie : Aires**
- **Entreprise sous-traitante Signalisation : Signature (Vinci Construction France)**
- **Entreprise sous-traitante Désamiantage : Cms (Vinci Construction France)**
- **Entreprise sous-traitante Corps d'État Secondaire : Nvm Bat**

ABSTRACT

RENOVATION OF THE UNDERGROUND ROADS OF LES HALLES IN PARIS

VINCI : E. CHEVALLIER, W. TSOPNANG, G. SMITH, P. LABORIE

Structural re-engineering of the underground roads of Les Halles is a complex renovation project in a constrained environment: the site of Les Halles, in the heart of the French capital. This is a project carried out in the dark, unknown, relatively invisible but essential for satisfactory functioning of the facility in complete safety. The technical exploits required and interfacing between all those involved in the work on site make this an extraordinary project. After the execution phase, project adjustments and fine tuning are a reality requiring that designers and contractors be capable of reaction, adaptation and a spirit of enterprise. A knowledge of the existing structure, which is more than 30 years old, is a mandatory requirement for the success of this project. □

LA REORDENACIÓN DE LAS VÍAS DE CIRCULACIÓN SUBTERRÁNEAS DEL BARRIO DE LES HALLES EN PARÍS

VINCI : E. CHEVALLIER, W. TSOPNANG, G. SMITH, P. LABORIE

La obra de reestructuración de las vías de circulación subterráneas del barrio de Les Halles es una importante obra de rehabilitación en un entorno difícil: el barrio de Les Halles, en el centro de la capital francesa. Es la obra de la sombra, desconocida, poco visible pero indispensable para el buen funcionamiento del lugar, de forma completamente segura. Las proezas técnicas que se deben realizar, así como las interfaces entre todos los participantes en las obras hacen que se trate de un proyecto atípico. A pesar de la fase ejecución, los ajustes y la puesta a punto del proyecto son una realidad que moviliza a los diseñadores y a las empresas sobre su capacidad para reaccionar, adaptarse y emprender. El conocimiento de la estructura existente, con más de 30 años de antigüedad, es una obligación para el éxito de este proyecto. □



FIGURE 1 © PHILIPPE PROST, ARCHITECTE/AAPP©ADAGR. 2014©AITOR ORTIZ

LE MÉMORIAL INTERNATIONAL DE NOTRE-DAME-DE-LORETTE UN NOUVEL OUVRAGE PATRIMONIAL EN BFUP, DISTINGUÉ PAR L'ÉQUERRE D'ARGENT 2014

AUTEURS : PHILIPPE PROST, ARCHITECTE - STÉPHANE DANDOY, DIRECTEUR TECHNIQUE, EIFFAGE TP NORD - JÉRÔME FREZIN, DIRECTEUR DE TRAVAUX, EIFFAGE TP NORD - AMÉLIE BOUHOURS, INGÉNIEUR, EIFFAGE TP VIAPONTIS DÉPARTEMENT BSI®

UN MÉMORIAL INTERNATIONAL QUI PRÉSENTE LES 579 606 NOMS DE SOLDATS DE LA PREMIÈRE GUERRE MONDIALE VIENT D'ÊTRE INAUGURÉ PRÈS D'ARRAS. SA STRUCTURE EST COMPOSÉE D'UN ANNEAU D'UN PÉRIMÈTRE DE 328 M DONT UNE PARTIE EN PORTE-À-FAUX SUR 60 M ENVIRON. CET OUVRAGE EST UNE PROUESSE TECHNIQUE, EN RAISON DE SA GÉOMÉTRIE TRÈS PARTICULIÈRE ET COMPLEXE. LE MATÉRIAU PRINCIPAL EST UN BÉTON FIBRÉ À ULTRA-HAUTE PERFORMANCE, ICI LE BSI® D'EIFFAGE. LA TRÈS GRANDE DURABILITÉ DE CE MATÉRIAU PERMETTRA À CET ANNEAU DE LA MÉMOIRE DE RÉSISTER AU TEMPS ET D'APPARAÎTRE COMME UN SYMBOLE DANS LE SITE DE NOTRE-DAME-DE-LORETTE.



FIGURE 2 © PHILIPPE PROST, ARCHITECTE/AAPP@ADAGP - PIERRE DI SCIULLO, GRAPHISTE, 2014 ©AITOR ORTIZ
 FIGURE 3 © PHILIPPE PROST, ARCHITECTE/AAPP@ADAGP - YANN TOMA, "LA GRANDE VEILLEUSE" ©ADAGP, 2014 ©AITOR ORTIZ

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Pour commémorer le centenaire de la Première Guerre Mondiale, un mémorial international vient d'être construit près d'Arras sur le plateau de Notre-Dame-de-Lorette, qui abrite la plus grande nécropole nationale. Ce monument rend hommage à la fois aux vaincus et aux vainqueurs. C'est l'un des plus grands mémoriaux au monde, puisqu'il réunit 579 606 noms de soldats tombés sur le sol de la Région Nord-Pas-de-Calais, présentés par ordre alphabétique, sans distinction de nationalité, amis et ennemis d'hier mélangés (figures 1 et 2). Ce mémorial international, construit sous la maîtrise d'ouvrage de la Région Nord-Pas-de-Calais, voit le jour en 2014 pour le centenaire de la Grande Guerre. Il a été inauguré par François Hollande, président de la République, le 11 novembre 2014.

En désignant le lauréat du concours en avril 2012, le jury a salué un monument magnifique, à la fois respectueux et puissant. Le mémorial de Notre-Dame-de-Lorette constituera un point central

1- Vue aérienne du Mémorial.

2- Détail de la typographie « Lorette », conçue par P. di Scullio.

3- Vue de la zone précontrainte en porte-à-faux.

1- Aerial view of the memorial.

2- Detail of the "Lorette" typography, designed by P. di Scullio.

3- View of the cantilever prestressed zone.

de la mémoire collective, française et internationale, sur le territoire du Nord-Pas-de-Calais.

La structure en forme d'ellipse est composée d'un anneau d'un périmètre de 328 m. Elle se soulève en porte-à-faux sur près de 60 m (figure 3). L'architecte expliquait ainsi son projet lors de la présentation à la presse le 22 juin 2012 : « (...) Pour réunir les ennemis d'hier, rassembler les 600 000 noms de combattants morts sur les champs de bataille du Nord-Pas-de-Calais, nous avons choisi l'anneau comme figure, en pensant à la ronde que forment ceux qui se tiennent par la main. Anneau synonyme à la fois d'unité et d'éternité : unité car les noms forment alors une sorte de chaîne humaine, éternité puisque les lettres s'enchaînent sans fin, l'ordre alphabétique prévalant sur toute distinction de nationalité, de grade, de religion. (...) Ancré dans le sol sur les deux-tiers de son périmètre, l'anneau s'en détache lorsque la déclivité du terrain s'accroît. Son porte-à-faux est là pour rappeler que la paix demeure toujours fragile. »

Le jardin central reprendra les couleurs du « Chemin de Mémoire », chaque fleur représentant une des puissances belligérantes : les coquelicots rouges pour les anglophones, les myosotis blancs pour l'Allemagne, et les bleuets pour la France.

L'ouvrage a été distingué par le jury de l'Équerre d'Argent le 17 novembre 2014, dans la catégorie « Culture, jeunesse et sport ».

Il vient également d'être nominé pour le « European Prize for Contemporary Architecture - Mies Van der Rohe Award 2015 ».

En plus de son aspect mémoriel, cet ouvrage est aussi une prouesse technique : c'est l'un des tous premiers ouvrages justifiés suivant les Recommandations BFUP AFGC révisées en juin 2013 ; sa partie précontrainte est réalisée en voussoirs préfabriqués à joints conjugués ; sa géométrie très particulière, avec des rayons en plan de 101 m et de 27,5 m seulement pour des portées de 28, 56 et 37 m, conduit à de fortes sollicitations de flexion-torsion peu intuitives.

L'entrée du mémorial a également amené à des recherches sur l'emploi de bétons colorés. Le matériau principal, qui permet au constructeur d'atteindre l'élégance souhaitée par l'architecte, est un Béton Fibré à Ultra-Haute Performance : le BSI®.

UN MATÉRIAU À L'ÉPREUVE DU TEMPS : LE BSI®

LE BSI® : LE BFUP DU GROUPE EIFFAGE

Le Béton Fibré à Ultra-Haute Performance utilisé pour la réalisation des voussoirs préfabriqués de l'ouvrage, des dalles de sol et des éléments de couverture est le BSI® (Béton Spécial Industriel).

Le BSI® est régi par un brevet Eiffage déposé en 1998. Il est formulé à partir d'un mélange préparé dit prémix, d'eau, de superplastifiant et de fibres métalliques ou synthétiques suivant les utilisations.

Eiffage TP assure l'intégralité du suivi de la chaîne de production du BSI®, à savoir :

- L'achat des matières premières,
- Le suivi de l'usine de façonnage du prémix,
- Les prélèvements conservatoires,
- Le contrôle des matières premières et du produit manufacturé,
- Le mode de malaxage,
- La mise en œuvre,
- Le suivi de production,
- Le mode de stockage.

CARTE D'IDENTITÉ DU BSI®

Tout BFUP présente une carte d'identité, répertoriant ses caractéristiques à prendre en compte pour les calculs justificatifs des structures, qui sont à valider par les épreuves de convenance et de contrôle.

La carte d'identité du BSI® (tableau A) a été établie selon les préconisations du document « Bétons fibrés à ultra-hautes performances - Recommandations » (SETRA-AFGC, révision juin 2013). Il n'est pas nécessaire de procéder à un traitement thermique ou à

un étuvage pour obtenir l'ensemble des propriétés, en particulier la résistance mécanique.

Le BSI® est un matériau étanche, à matrice compacte, insensible aux cycles de gel/dégel. Pourvu d'une grande dureté liée à la présence de

granulats sélectionnés et au système de fibrage, le BSI® possède un excellent comportement vis-à-vis des chocs et de l'abrasion. Il résiste également très bien aux différents agents chimiques, même en milieu acide.

L'adjonction de fibres, métalliques ou polypropylène suivant le cas, confère au BSI® une résistance en traction. Cette propriété permet d'éviter le plus souvent la présence d'armatures passives, et donc d'optimiser fortement les épaisseurs de matériaux : les épaisseurs des pièces du mémorial sont de 2 cm seulement pour les dalles de sol, de 4 cm pour les voussoirs simples.

TABLEAU A : CARTE D'IDENTITÉ DU BSI®

Caractéristiques à l'état frais		
Durée pratique d'utilisation	DPU	Jusqu'à 90 min.
Étalement au cône DIN (sans secousse)	e (cm)	58 ≤ e ≤ 68
Teneur en air occlus	AO	≤ 3,5%
Caractéristiques à l'état durci		
Densité	ρ	2,75 t/m ³
Résistance caractéristique en compression à 28 j	f _{c28}	165 MPa
Résistance caractéristique en traction à 28 j de la matrice	f _{t28}	- 8,0 MPa
Résistance caractéristique en traction à 28 j du matériau fibré	σ _{bt-28}	- 6,3 MPa
Valeur caractéristique du module d'Young à 28 j	E _{i28}	58 GPa
Coefficient de Poisson	ν	0.2
Valeur caractéristique du module de cisaillement	G _{i28}	25 GPa
Coefficient de dilatation thermique	α	13 μm/m
Retrait endogène à l'infini	ε _{re-∞}	600 μm/m
Retrait de dessiccation à l'infini	ε _{rd-∞}	240 μm/m
Fluage propre et de dessiccation (chargement à t ₁ = 7 j)	K _{fl}	1
Indicateurs de durabilité		
Porosité accessible à l'eau		< 5%
Perméabilité à l'oxygène		< 10-20 m ²
Coefficient de diffusion des ions chlorure		0,23 %
Absorption capillaire		0,22 g/cm ²
Exemple de composition		
Prémix	2 296 kg	± 2%
Superplastifiant	35 kg/m ³	± 5%
Eau de gâchage	195 kg/m ³	± 2%
Fibres métalliques	195 kg/m ³	± 2%

4- Vue en coupe des voussoirs renforcés en zone précontrainte.

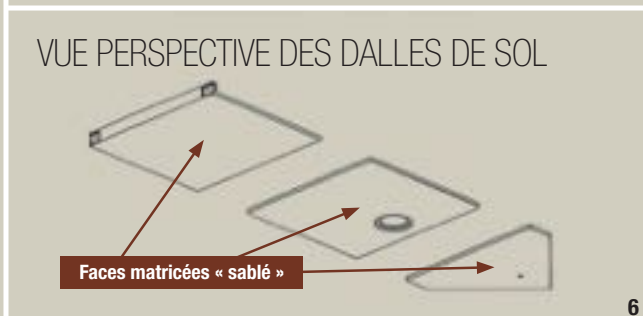
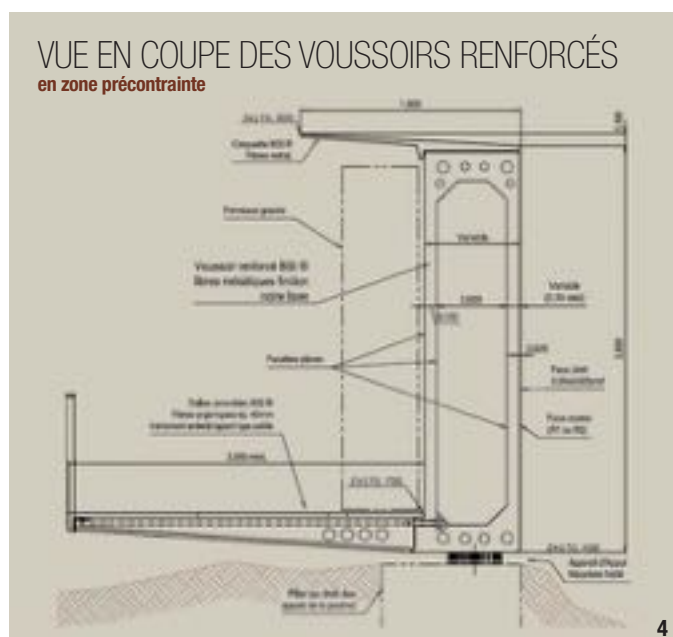
5- Vue perspective de la face de coulage.

6- Vue perspective des dalles de sol.

4- Cross-section view of the strengthened segments in the prestressed zone.

5- Perspective view of the casting surface.

6- Perspective view of the ground slabs.



FIGURES 4, 5 & 6 © EIFFAGE TP

IDENTIFICATION DES FACES DE COULAGE

Coulage à plat

7

FIGURES 7, 8 & 10 © EIFFAGE TP - FIGURES 9 & 11 © H. ABBADIE

8

VUE PERSPECTIVE du moule de voussoir simple

Coulage par le dessus

9

COUPE SUR MOULE de voussoir simple

Coulage

10

Clefs de décoffrage



11

LA PRODUCTION DU PREMIX

Le prémix est le mélange des matériaux granulaires secs du BSI® - tels que ciment, fumée de silice et granulats - avec une tolérance de 1 à 2 % sur chaque constituant. Ce critère, dicté dans le document « Bétons fibrés à ultra-hautes performances - Recommandations » (SETRA-AFGC, révision juin 2013), permet de s'assurer de la conformité du béton correspondant obtenu. Le concept de prémix permet aussi de s'affranchir des variations de teneur en eau des granulats et de maîtriser la composition.

FABRICATION DU BÉTON

La fabrication du BSI® se fait en centrale à béton classique. Elle est automatisée.

Le malaxage des prémix, eau, superplastifiant et fibres dure environ 15 à 20 minutes.

→ Essai de contrôle avant la mise en œuvre :

- un étalement au cône DIN (norme DIN 1048), sur table métallique préalablement humidifiée, sans choc, à T0 + 2 min, sur chaque gâchée (diamètre de l'étalement compris entre 58 et 65 cm avec absence de ségrégation) ;
- une teneur en air occlus à l'aéromètre à béton (valeur ≤ 3%) + une mesure de la densité à l'état frais (avec la cuve de l'aéromètre) ;
- une mesure de la température du béton à l'état frais sur chaque gâchée.

→ Essai de contrôle de conformité :

- une résistance moyenne à la compression déterminée à partir

7- Identification des faces de coulage.

8- Bétonnage des dalles de sol en BSI®.

9- Vue perspective du moule de voussoir simple.

10- Coupe sur moule de voussoir simple.

11- Moule et noyaux des voussoirs simples.

7- Identification of casting surfaces.

8- BSI® concreting of ground slabs.

9- Perspective view of single segment mould.

10- Cross section on single segment mould.

11- Mould and cores of single segments.

de 3 cubes d'arête 10 cm à 24 heures par jour de production + mesures de la densité ;

- une résistance moyenne à la compression déterminée à partir de 3 cubes d'arête 10 cm (démoulés à 24 heures d'âge puis immergés dans une eau à 20 °C) à 28 jours d'âge (> 165 MPa) par jour de production + mesures de la densité.

PLANNING DE FABRICATION

Un des avantages du BSI® est sa capacité à monter en résistance très rapidement et sans traitement thermique.

La valeur moyenne de résistance à la compression étant comprise entre 60 et 80 MPa après 18 heures, il est possible de décoffrer tout type de pièce, même les plus fines, dès le lendemain d'un coulage.

Les fabrications sont donc organisées sur le principe d'une pièce par moule et par jour.

L'usine est équipée de sorte que la production soit possible tous les jours, à toute époque de l'année, sans contraintes d'intempéries.

De plus, l'aire de stockage des éléments fabriqués est suffisamment grande pour produire à l'avance et gérer un stock en vue de livraisons « à la demande » du chantier selon son rythme de pose.

Chaque élément est répertorié et marqué avec un numéro propre et issu du calepinage méthode. Cela engage la livraison, la mise en place sur le chantier et la traçabilité des pièces pour le suivi qualité.

Les moules sont tous spécifiques et de haute technicité, en métal, polyuréthane, et/ou bois.

Leur confection est confiée à des professionnels spécialisés sensibilisés à sa destination.

La durée moyenne de réalisation des coffrages est d'environ 6 à 8 semaines à partir des plans définitifs des coffrages des pièces. Dans le cadre du mémorial international, la production journalière comprenait :

- 1 voussoir simple de rayon 27,54 m,
- 1 voussoir simple de rayon 101,08 m,
- 1 voussoir renforcé de rayon 27,54 m,
- 1 voussoir renforcé de rayon 101,08 m,
- 3 casquettes,
- 9 dalles de sol,
- 1 support de galerie renforcé.

La production des éléments les plus nombreux, mais plus simples à réaliser, a duré environ 4 mois. Les voussoirs renforcés ont été fabriqués en 7 semaines.

PARTICULARITÉS DE FABRICATION DES PIÈCES EN BSI®

La coupe transversale de l'ouvrage, dans la partie renforcée, permet d'identifier les différentes pièces constituant le mémorial (figure 4).



12

FIGURE © EFFAGETP

CASQUETTES

256 consoles, de dimensions 1,90 m de long x 1,30 m de large, sont vues toutes faces. Il est donc nécessaire de les couler « à chant » pour que le talochage ne se fasse que sur une tranche (figures 5 et 6). La difficulté est concentrée dans la mise en œuvre du BSI® qui doit être le plus fluide possible, sans atteindre la ségrégation, afin de remplir le plus efficacement possible un moule d'épaisseur de 2 à 10 cm seulement sur une hauteur de 1,25 m. Malgré les précautions prises au regard de la finesse extrême des pièces, des zones de bullage sont apparues.

DALLES DE SOL

768 unités de dimensions 1,10 x 1,25 m² x 4 cm d'épaisseur, constituent le chemin de circulation en forme d'ellipse.

Une finition matricée type « sablé » est définie par l'architecte sur les faces vues et circulées pour compléter la qualité antidérapante naturelle du BSI®. Contrairement à un béton classique, les BFUP ne peuvent être grenailés ou sablés après décoffrage. Cela ferait ressortir les fibres et les arracherait partiellement.

Par conséquent, les dalles sont coulées à l'envers, avec la face circulée réalisée

12- Coupe sur voussoirs renforcés.

13- Voussoir renforcé en position de conjugaison.

14- Gains de précontrainte en position dans le moule.

15- Noyau décintrable avec abouts polystyrène et acier.

16- Voussoir renforcé en zone de stockage.

12- Cross section on strengthened segments.

13- Strengthened segment in conjugation position.

14- Prestressing ducts in position in the mould.

15- Removable core with polystyrene and steel end pieces.

16- Strengthened segment in storage area.



13



14



15



16

FIGURES 13, 14, 15 & 16 © H. ABBADIE

par un coffrage matricé. Cela permet également d'y inclure l'empreinte podotactile des dalles de rive (figures 6, 7 et 8).

Les faces talochées ne sont pas vues.

VOUSSOIRS SIMPLES

73 voussoirs simples composent les deux-tiers de l'Anneau de la Mémoire. D'une hauteur de 3,20 m et d'une largeur de 2,50 m, ils sont raidis par une paroi intérieure, de profondeur 0,80 m. L'épaisseur de ces éléments n'est que de 4 cm, alors que certains assurent une fonction de soutènement d'une hauteur de 2 m environ.

Seule la face extérieure de l'anneau est vue, cette face doit donc être coffrée, à plat pour un rendu parfait.

Pour être bien sûr de pouvoir remplir le « fond » du voussoir, la partie cintrée (à chacun des rayons) est coulée en premier en fond de moule, puis des contre-moules en caisson sont installés pour couler les parois (figures 9 et 10). Ces caissons sont munis d'un principe de clef de décoffrage à l'intérieur (figure 11).

D'un poids de 2,8 t, les voussoirs simples sont démoulés grâce à un système traversant le voile central, à une résistance du béton suffisante sans être trop élevée, car trop de maturation induit des microfissures de retrait empêché dans les angles et le blocage des caissons coffrants.



17
© EIFFAGE TP

VOUSSOIRS RENFORCÉS

49 voussoirs renforcés ferment l'ellipse sur la partie en encorbellement.

De mêmes dimensions extérieures que le voussoir simple, 3,20 m de hauteur, 2,50 m de large et 0,80 m de profondeur, mais de section rectangulaire d'épaisseur 10 cm, la particularité de ces voussoirs est la présence de gaines de post-contrainte pour tenue de l'ensemble en phase définitive.

Le bon enrobage au bétonnage et le bon maintien de ces gaines pourraient inciter à couler ces voussoirs en situation finale de pose.

Mais la valeur esthétique de la face extérieure de l'anneau est ici primor-

diale. Cette face sera donc coffrée de la même façon que celle d'un voussoir simple contigu. Le coffrage est donc « couché » avec un noyau central décintrable (figure 12).

Le moule est de loin l'objet le plus complexe, car il doit être aussi d'une précision très élevée pour permettre la pose des voussoirs avec 3 mm de jeu. Le principe de base retenu est la conjugaison des voussoirs.

Pour cela le coffrage doit permettre d'accueillir le voussoir N-1 coulé la veille, qui constituera une joue de coffrage pour le voussoir N du jour (figure 13). La géométrie de l'ouvrage nécessite de respecter ses exigences :

la face vue des voussoirs est cintrée mais l'ellipse présente 2 rayons de construction. Ceci engendre de nombreux réglages quotidiens du moule pour satisfaire aux exigences de la pose, beaucoup plus drastiques et sévères que pour un ouvrage en béton armé rectiligne. La bonne conjugaison des faces coffrées passe aussi par 4 têtes d'assemblage.

Les 10 gaines de précontrainte sont mises en place en continuité de celles du voussoir précédent, et réglées à l'aide de peignes confectionnés spécialement pour assurer leur bon positionnement individuel (figure 14).

Du fait de la précontrainte, des appuis de l'ouvrage, ou même des fenêtres, le noyau central est presque particulier pour chaque voussoir. Le tronçon commun a été réalisé en métal, tandis que les parties spéciales ont été, soit usinées dans du polystyrène extrudé (figure 15), soit réalisées de manière unique en métal pour coffrer précisément les bossages d'ancrage, dont quelques-uns sont renforcés de ferrailage passif.

Enfin aucun insert ne doit être oublié : 4 ancrés pour le levage en usine, 6 ancrés pour le levage et le basculement sur chantier, 4 douilles de fixation des panneaux de façade, 4 réservations pour fixation des casquettes, 3 réservations pour fixation des consoles support de dalles, 12 réservations et 12 inserts pour brélage des éléments à la pose. Chaque voussoir (figure 16) aura nécessité en moyenne 2,8 m³ ; suivant la présence des différents bossages, leurs poids varient de 7 à 10 t. Ils ont été coulés tous les jours, sauf quelques cas très particuliers. 18 heures après le début du bétonnage, la résistance au démoulage était atteinte et le béton présentait des températures entre 60 et 70°C.

PARTICULARITÉ ARCHITECTURALE : LES VOUSSOIRS FENÊTRES

2 voussoirs renforcés sont entièrement percés en leur centre pour permettre aux visiteurs de voir la plaine d'Artois depuis l'anneau.

Un coffrage central a donc été rajouté dans le moule, mais surtout un très fort ferrailage passif (figure 17) reprendra tous les efforts qui ne pouvaient être justifiés par le seul BSI® : il a été mis en place 250 kg/m³ d'aciers passifs. Il a fallu déployer d'intenses efforts lors de la mise en œuvre afin de s'assurer que le béton remplisse bien le moule au milieu des gaines et des aciers passifs, mais aussi pour garantir un parement de la fenêtre impeccable.

17- Voussoir fenêtre avec armatures de renfort et noyaux spécifiques.

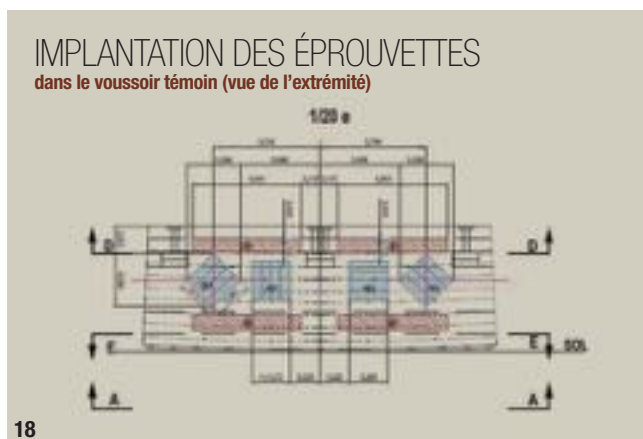
18- Implantation des éprouvettes dans le voussoir témoin (vue de l'extrémité).

19- Localisation des éprouvettes (en coupe).

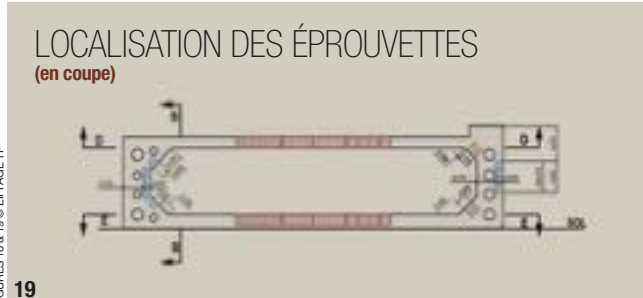
17- Window segment with specific reinforcing bars and cores.

18- Layout of test specimens in the control segment (end view).

19- Location of test specimens (cross section).



18



19

FIGURES 18 & 19 © EIFFAGE TP



© PHILIPPE PROST, ARCHITECTE/AAPP@ADAGP - PIERRE DI SCIULLO, GRAPHISTE, 2014 ©AITOR ORTIZ

VOUSSOIR DE CONVENANCE

De telles spécificités géométriques ont rendu indispensable la réalisation d'un voussoir de convenance. Comme le spécifient les recommandations BFUP, cet élément de convenance permet de prélever des éprouvettes, dans les conditions de la production de série, afin de vérifier que les hypothèses des calculs (densité, résistances en compression et flexion, répartition des fibres) sont vérifiées.

Un premier élément a donc été coulé dans les conditions présentées ci-avant. Puis des prismes de 10x10x40 cm ou 7x7x28 cm ont été découpés (figures 18 et 19).

Il a été découpé pas moins de 80 éprouvettes sur les 4 faces, dans toutes les directions, pour en tester 60 en laboratoire agréé, afin de les comparer aux résultats d'éprouvettes moulées, et de corroborer le coefficient d'orientation des fibres pris en compte dans les calculs.

Leur découpage, qui a duré environ 3 semaines, a fait l'objet d'une méthodologie bien précise.

Des voussoirs - prototypes ont également permis à la Maîtrise d'œuvre et à la Maîtrise d'ouvrage de s'assurer de la bonne synthèse et coordination des éléments préfabriqués en béton avec les panneaux nominatifs.

20- Vue piéton du mémorial.

20- Pedestrian's view of the memorial.

Le matériau choisi par l'architecte pour la réalisation de la structure est un Béton Fibré à Ultra-Haute Performance (BFUP) ; une partie des éléments préfabriqués qui constituent le mémorial sont assemblés par précontrainte.

Les équipes d'Eiffage TP ont été retenues pour réaliser cet ouvrage, avec le BFUP d'Eiffage : le BSI®. Ce matériau a permis de réaliser des éléments préfabriqués très fins, mais aussi des éléments de grande résistance tant en compression qu'en cisaillement, afin de répondre aux sollicitations particulières. La très grande durabilité de ce matériau lui permettra d'être présent pour le prochain siècle dans ce lieu de mémoire. □

CONCLUSION

À la demande de la Région Nord-Pas-de-Calais, un mémorial international en hommage aux soldats tombés au cours de la Première Guerre Mondiale a été érigé. Implanté sur le flanc de la colline de Notre-Dame-de-Lorette, cet ouvrage très épuré présente les noms des soldats des différentes nationalités parties au conflit.

PRINCIPALES QUANTITÉS

BÉTON : 690 m³ dont 85 m³ de béton coloré

ACIERS PASSIFS : 90 t

PRÉCONTRAINTÉ : 16,5 t torons T15S, 12 ancrages 19 T15, 12 ancrages 7 T15

PIEUX TARIÈRE CREUSE : 58 unités Ø500 mm et Ø600 mm

ÉLÉMENTS BSI® :

- 73 voussoirs simples
- 49 voussoirs renforcés précontraints
- 49 supports de galerie
- 256 consoles
- 256 dalles de sols en 3 éléments

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Région Nord-Pas-de-Calais, Lille

ARCHITECTE : Agence d'Architecture Philippe Prost, Paris

MAÎTRE D'ŒUVRE STRUCTURE : C & E Ingénierie, Paris

MAÎTRE D'ŒUVRE FLUIDES : Bureau Louis Choulet, Clermont-Ferrand

BUREAU DE CONTRÔLE : Btp Consultants, Marçq en Baroeul

ENTREPRISE LOT 1 GROS ŒUVRE ÉTENDU : Groupement Eiffage TP Nord (mandataire) - Eiffage TP Viapontis - Eiffage Énergie Tertiaire Lens.

BUREAU D'ÉTUDE D'EXÉCUTION : Eiffage TP BIEP

CONTRÔLE EXTERNE DES ÉTUDES D'EXÉCUTION : Cerema, Sourdun.

ABSTRACT

THE INTERNATIONAL MEMORIAL OF NOTRE-DAME-DE-LORETTE A NEW HERITAGE STRUCTURE IN UHPFRC, AWARDED THE 2014 EQUERRE D'ARGENT PRIZE

P. PROST - S. DANDOY, EIFFAGE TP - J. FREZIN, EIFFAGE TP - A. BOUHOURS, EIFFAGE TP

Under the overall management of the Nord-Pas-de-Calais Region, architect Philippe Prost designed an international memorial in tribute to the 579,606 soldiers of all nationalities who fell there during the First World War. The material chosen by the architect for execution of the structure is an ultra-high-performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC); some of the prefabricated elements which form the memorial are assembled by prestressing. The teams of Eiffage TP executed this structure with Eiffage's UHPFRC: BSI®. □

EL MEMORIAL INTERNACIONAL DE NOTRE-DAME-DE-LORETTE UNA NUEVA OBRA PATRIMONIAL CON BFUP, DISTINGUIDA CON L'EQUERRE D'ARGENT 2014

P. PROST - S. DANDOY, EIFFAGE TP - J. FREZIN, EIFFAGE TP - A. BOUHOURS, EIFFAGE TP

La Región Norte-Paso de Calais encargó al arquitecto Philippe Prost el diseño de un memorial internacional en homenaje a los 579.606 soldados, de todas las nacionalidades, caídos durante la Primera Guerra Mundial. El material elegido por el arquitecto para la realización de la estructura es un Hormigón de ultra alta resistencia armado con fibras (BFUP); algunos de los elementos prefabricados que constituyen el memorial están ensamblados por pretensado. Los equipos de Eiffage TP realizaron esta estructura, con el BFUP de Eiffage: el BSI®. □

RÉNOVATION DE L'HÔTEL ROYAL SUR LES RIVES DU LÉMAN

AUTEURS : YANNIS TORNERO, RESPONSABLE D'EXPLOITATION, RESIREP - LECKMAN JOWAHEER, CONDUCTEUR DE TRAVAUX, RESIREP - ALAIN SIMON, RESPONSABLE DE PÔLE, EIFFAGE TP DMI/PÔLE RÉPARATION ET RENFORCEMENT - AMANDINE DE BARBA, INGÉNIEUR D'ÉTUDES, EIFFAGE TP DMI/PÔLE RÉPARATION ET RENFORCEMENT - LUC DEFAUCHEUX, INGÉNIEUR D'ÉTUDES, EIFFAGE TP PMGP

L'HÔTEL ROYAL, SITUÉ À ÉVIAN-LES-BAINS SUR LES RIVES DU LAC LÉMAN, FAIT L'OBJET D'UNE RÉNOVATION HISTORIQUE. AFIN D'ASSURER LA PÉRENNITÉ STRUCTURELLE DU PALACE TOUT EN PERMETTANT DE NOUVEAUX AMÉNAGEMENTS INTÉRIEURS ET EN TOITURE, DE NOMBREUX TRAVAUX DE RENFORCEMENT ONT ÉTÉ ENGAGÉS AU NIVEAU DES POUTRES, DES PLANCHERS, DES POTEAUX...



© EIFFAGE TP

PRÉSENTATION DU PROJET

La société Evian Resort (SAEME) a mené ces dernières années plusieurs projets de rénovation et de modernisation de ses installations sur la commune d'Évian-les-Bains (74). Après les projets menés à bien sur le Casino et sur le golf qui accueille l'Evian Championship®, cette société filiale du groupe Danone - propriétaire des eaux minérales du

1- Représentation d'ensemble du projet.

1- Overall view of the project.

nom de la ville - s'est tournée vers son offre hôtelière de luxe : l'hôtel Ermitage et le palace Hôtel Royal.

Si les travaux de l'hôtel Ermitage ont été achevés en 2012, ceux de l'Hôtel Royal, structure centenaire monumentale (figure 1), sont toujours en cours à l'heure actuelle. Divisé en plusieurs phases, ce projet consiste en une rénovation d'ensemble du bâtiment,

des sous-sols jusqu'aux combles. Tous les corps d'état sont concernés, de la structure aux éclairages en passant par les ascenseurs ou le rafraîchissement des fresques du rez-de-jardin datant de la construction. Le défi est de taille : rénover l'ensemble du palace en trois ans, tout en maintenant des périodes d'exploitation à certaines saisons cruciales de l'année. Ce défi est en passe ►

d'être relevé par un maître d'ouvrage engagé, assisté, entre autres, du Cabinet Auris et par une équipe de maîtrise d'œuvre menée par le cabinet d'Architecte François Chatillon, aux côtés duquel l'atelier Vies Ages, Champsaur et bien d'autres suivant leurs spécialités.

Pour réaliser les phases du chantier étalées sur la période 2013-2015, plusieurs filiales du groupe Eiffage ont été retenues : Eiffage Construction (EC) Rhône pour le gros œuvre, Eiffage Énergie et enfin Resirep qui est intervenu en groupement avec EC pour apporter son savoir-faire en réparation et renforcement de structures, appuyée par la Direction des Moyens d'Ingénierie (DMI) d'Eiffage TP pour les études.

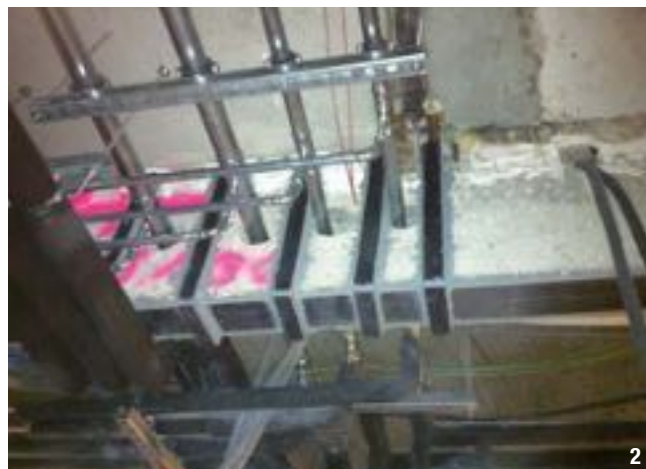
DÉFINITION DES RÉPARATIONS ET RENFORCEMENTS

Une étude préalable de l'état de la structure avait été menée en 2012 afin de permettre l'organisation de l'appel d'offres pour les travaux.

Mais les conditions d'exploitation de l'hôtel étaient telles qu'il fut bien difficile à l'équipe chargée du diagnostic, constituée alors de l'Apave, de Palmer Consulting et du bureau d'études ESBA, de définir avec précision l'état réel des structures et l'ampleur des réparations à engager.

En effet l'activité dans le palace ne permettait l'accès qu'à quelques pièces seulement et imposait un maximum de précautions concernant le bruit, ce qui limita fortement les moyens de diagnostic.

Dès le départ du projet le constat est cependant assez clair : les bétons sont pour la plupart carbonatés, de résistance peu élevée, les enrobages sont faibles à inexistantes et de manière



© EIFFAGE TP

générale les dalles, poutres et poteaux qui constituent l'ossature du bâtiment sont dégradés.

Resirep a donc proposé, en accord avec l'équipe de maîtrise d'œuvre, la réalisation d'une campagne d'essais complémentaire sur les éléments structuraux du bâtiment, afin de déterminer le plus précisément possible, au cas par cas, l'ampleur des pathologies avérées. Les investigations ont été adaptées en recourant à tout un panel d'essais (CAPO test, carottages, sondage au marteau pneumatique, scléromètre...) pour permettre de définir les caractéristiques résiduelles de chaque élément porteur.

À partir de ces données d'entrée et compte-tenu des charges à supporter, il a pu être proposé au maître d'œuvre un catalogue de solutions de réparation ou de renforcement le cas échéant, ainsi qu'une évaluation du quantitatif réel des travaux correspondants. Cette entreprise était de taille quand on sait par exemple qu'une aile complète du

palace devait être rendue aux équipes de second œuvre moins de trois mois après le début des travaux.

Parmi ces solutions on peut citer le béton projeté par voie sèche pour reconstituer les enrobages voire tout ou partie de la structure de certaines dalles, poutres ou de certains poteaux, les matériaux composites à base de fibres de carbone pour renforcer les poteaux ou les poutres dont les résistances résiduelles vis-à-vis des descentes de charges projetées sont incompatibles.

D'autres critères que la capacité résistante entrent également en jeu dans le choix des solutions, comme l'adaptation aux percements destinés aux futurs réseaux de fluides ou encore la contrainte de ne pas augmenter la section de certains porteurs imposée par la MOA. Aux côtés de Resirep pour cette mission, la DMI d'Eiffage TP a été chargée de définir les différentes solutions de renforcement.

LES SOLUTIONS DE RENFORCEMENT

Les nouveaux aménagements prévus dans tout l'hôtel, et en particulier sur les toitures des ailes Est et Ouest, ont conduit à une augmentation significative des charges appliquées sur de nombreux éléments porteurs de types poutres et poteaux en béton armé.

Dans le souci de ne pas engager les volumes intérieurs disponibles, des solutions de renforcement permettant de respecter au mieux les dimensions initiales avant travaux, ont été recherchées.

Des solutions particulièrement adaptées à ce contexte sont sans nul doute celles mettant en œuvre des matériaux composites.

2- Exemple d'une poutre renforcée à la fois en flexion et à l'effort tranchant.

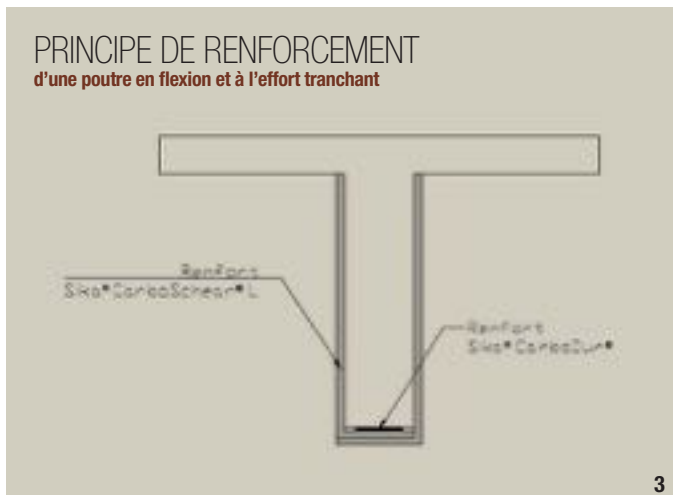
3- Principe de renforcement d'une poutre en flexion et à l'effort tranchant.

4- Principe de renforcement à l'effort tranchant.

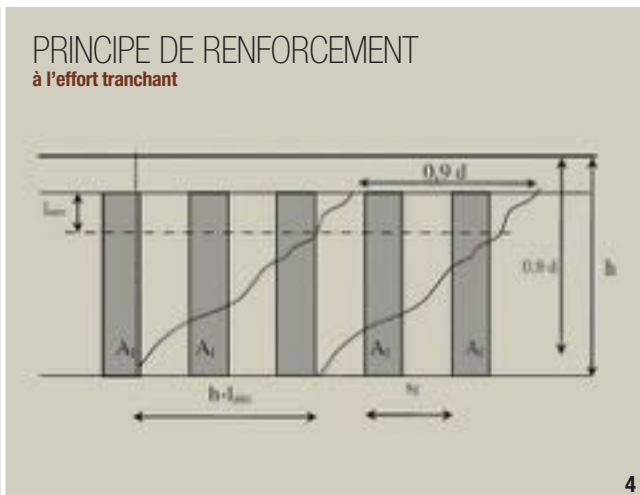
2- Example of a beam strengthened in both bending and shear resistance.

3- Schematic of beam strengthening for bending and shear resistance.

4- Schematic of shear resistance strengthening.



© EIFFAGE TP



© GUIDE AFGC 2011

En se basant sur les Recommandations de l'AFGC « Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites » et sur l'Avis Technique des procédés Sika, des renforcements de poteaux, de poutres en flexion et de poutres vis-à-vis de l'effort tranchant, ont été étudiés au cas par cas.

RENFORCEMENT DE POUTRES EN FLEXION

Pour augmenter leur capacité en flexion, des lamelles Sika® CarboDur® ont été collées en sous-face des poutres concernées. Ces lamelles présentent un module de déformation de 165 GPa et une résistance à la rupture en traction de 2 800 MPa. L'épaisseur du pultrudé (lamelle seule) n'est que de 1,2 mm, à laquelle s'ajoute l'épaisseur du film de colle époxydique (Sikadur 30).

Ces renforts composites sont dimensionnés en effectuant un calcul phasé à l'État Limite de Service (état initial à vide + état final renforcé avec charges d'exploitation). Un deuxième calcul permet de vérifier que la structure ne subit que des déformations limitées sous chargement à l'État Limite Ultime fondamental. Enfin une vérification est menée à l'État Limite Ultime sous combinaison accidentelle afin de s'assurer de la stabilité des poutres en situation d'incendie sans prise en compte des lamelles carbone.

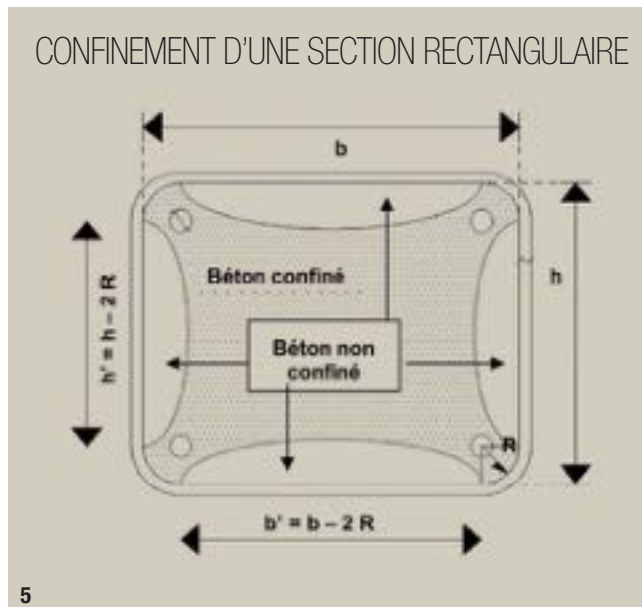
À noter qu'en l'absence de certains plans, des campagnes de sondages couplés à des relevés au Ferroskan®, ont permis de valider les hypothèses relatives aux armatures en place dans les différentes poutres.

RENFORCEMENT DE POUTRES À L'EFFORT TRANCHANT

Pour les besoins des différents corps d'état secondaires, un grand nombre de carottages devait être réalisé à travers les poutres, altérant leur capacité résistante à l'effort tranchant lorsque ces carottages venaient sectionner les cadres et étriers en place. L'espacement de certains carottages et la géométrie des poutres ont conduit à l'utilisation d'équerres Sika® CarboShear® L, mises en œuvre par paires avec recouvrement en sous-face des poutres (figure 3).

Ces éléments sont des profilés préformés en L, et font partie du système de renfort Sika® CarboDur®.

Ils présentent une largeur de 40 mm pour une épaisseur de 2 mm. Ils viennent en complément ou en remplace-



5
© PROCÉDÉ SIKKA

5- Confinement d'une section rectangulaire.
6- Un des poteaux renforcés par confinement.

5- Confinement of a rectangular cross section.
6- One of the pillars strengthened by confinement.

ment d'armatures transversales pour assurer la reprise d'un effort tranchant. Ils sont justifiés à l'État Limite Ultime selon les recommandations de l'AFGC (figure 4), en considérant une hauteur réduite de poutre dans l'application du principe de calcul en treillis. Cette réduction est liée à la longueur d'ancrage du composite collé.

Certaines poutres ont fait l'objet d'un renforcement en flexion et à l'effort tranchant (figure 2). Dans ce cas les profilés préformés en L sont collés après les lamelles longitudinales, à l'instar des cadres d'effort tranchant entourant les aciers de flexion longitudinale.

RENFORCEMENT DE POTEAUX EN BÉTON

Le projet de rénovation de l'hôtel comprenait également le renforcement

d'un certain nombre de poteaux en béton armé de section rectangulaire. La nécessité de ce renforcement provenait :

- D'une part, d'une trop faible résistance en compression du béton (résistances mesurées comprises entre 8 MPa et 21 MPa),
- D'autre part, de la réévaluation à la hausse des descentes de charges inhérentes au projet de rénovation et de transformation du bâtiment.

L'augmentation de la capacité portante des poteaux a été obtenue par confinement (figure 5). Celui-ci est réalisé au moyen de bandes de tissu de fibres de carbone (SikaWrap®-230C/45) de largeur 300 mm et d'épaisseur 0,45 mm, associées à de la résine époxydique (Sikadur®-330). L'efficacité de ce procédé est modulée par le réglage de deux paramètres : nombre de bandes superposées et espacement des plis (figure 6).

L'efficacité d'un confinement dépendant fortement de l'élançement transversal b/h (longueur/largeur), il devient plus pertinent, pour les poteaux de fort élançement transversal, de mettre en œuvre une solution de renforcement par substitution d'un nouveau béton projeté avec apport d'armatures, à une couche périphérique de béton ancien. Dans ces cas, il a été procédé par repiquage du béton sur une certaine épaisseur, puis à sa reconstitution par projection d'un béton de résistance plus élevée.

Un béton de classe C30/37 a été retenu. Outre sa résistance en compression, son module de déformation est nettement plus élevé que celui du béton en place.

Les vérifications sont alors effectuées avec une distribution de l'effort dans le noyau de béton existant et la ceinture de béton d'apport au prorata des raideurs.

Les deux techniques de renforcement (confinement par composite et chemisage par béton projeté) pouvant être combinées pour accroître leur efficacité.

AUTRES RENFORCEMENTS

D'autres types de renforcement ont également été étudiés dans le cadre de ce projet.

On peut citer par exemple la reprise d'un plancher dont le revêtement décoratif de grande valeur ne supportait que très peu de déformations, ou encore la création d'une nouvelle cage d'ascenseur qui entraînait des modifications de la structure porteuse et un apport de charges important.



6
© EIFFAGE TP



7



8



9

© ERFAGE TP

RÉALISATION DES TRAVAUX PROJECTION DE BÉTON PAR VOIES SÈCHE ET HUMIDE POUR RECONSTITUTION DES SECTIONS DE PORTEURS

Parmi les solutions « traditionnelles » qui ont été mises en œuvre pour le renforcement des porteurs, une grande partie des travaux a consisté dans la projection en sous-face de dalles ou de poutres de béton par voie sèche (figure 7). Cette solution, bien que contraignante en termes d'exécution (poussière et difficulté dans la co-activité essentiellement) présente l'avantage de permettre de forts rendements et une facilité d'alimentation des ateliers de projection à travers tout l'hôtel relativement aisée et souple. Dans un chantier où la contrainte principale est le planning et la co-activité très importante, cette solution est une des clés de la réussite de l'opération. Les équipes de Resirep ont dû traiter dans un délai extrêmement réduit les huit étages et les annexes de l'hôtel, soit près de 11 000 m² de dalles et 3 000 m² de poutres (retombées et sous-face), incluant les coffrages et les ferrallages complémentaires.

Certaines zones, plus confinées et d'accès plus difficile tel que l'entresol, ont été reprises selon le même principe mais par voie humide, permettant ainsi l'absence de poussière et un travail certes beaucoup moins rapide mais plus soigné et dénué de tout risque pour les équipes de travaux.

RENFORCEMENTS PAR MATÉRIEAUX COMPOSITES

Les renforcements de poteaux et de poutres à l'aide de fibres de carbone ont été réalisés en tenant compte de nombreuses contraintes. Parmi elles : les températures basses (l'« hiver savoyard ») dans un hôtel dont les menuiseries ont été déposées, la co-activité avec de nombreux corps d'état pour la plupart générateurs de poussière et de chocs sur les tissus fraîchement posés, voire les percements de fixation de réseaux divers sous la contrainte d'un planning serré. Rien n'était épargné sur ce genre d'opération aux équipes de mise en œuvre de tissus, plats et équerres carbonées, qui nécessitent au contraire des conditions saines et stables pour leur application (support propre, sain et température

7- Projection de béton par voie sèche en sous-face de dalle.

8- Sous face brute de projection, avant habillage.

9- Exemple d'état des porteurs avant réparation.

7- Dry shot-creting on the underside of the slab.

8- As-shotcreted underside, before cladding.

9- Example of the condition of loadbearing elements before repair.

d'application de 18°C minimum pour polymérisation de la résine de collage). Pour faire face à cela, les équipes d'EC Rhône et de Resirep ont conçu un système de confinement partiel des étages (figure 10) en fonction de l'avancement des opérations, permettant à la fois le chauffage et la protection des éléments renforcés.

Les équipes ont travaillé sur deux postes pour permettre le renforcement de plus de 200 poteaux en trois mois, sans compter les renforcements de poutres.

La mise en œuvre était alors conforme aux cahiers des charges. La préparation du support et de son état de planéité précis au millimètre près pour assurer l'adhérence parfaite des tissus. Pour cela étaient appliqués par voie humide des mortiers de réparation Sika® Mono-top®-412N à haute résistance et thixotropie importante classés R4 au sens de la norme EN 1504-3 (figure 11). Après contrôle des préparations, une attention spécifique était portée sur l'absence de poussière et l'application d'une première couche de colle était réalisée, dans le respect des épaisseurs spécifiées par le fabricant dans ce type



© EIFFAGE TP



de contexte, puis les premières bandes de tissu étaient appliquées et marouflées sur les poteaux. Les écarts entre anneaux et les recouvrements entre bandes ont été adaptés par la DMI en fonction des charges à reprendre, ainsi que le nombre de plis (figures 6 et 10). Enfin les couches ont été saturées. L'ensemble des travaux s'est fait sous contrôle de température dans les zones confinées.

Un contrôle qualité permanent a été réalisé par une personne dédiée à l'opération, s'assurant de l'homogénéité des applications et vérifiant le respect des spécifications du procédé à chaque étape. □

10- Zone de confinement.
11- Poteau prêt à recevoir le chemisage composite.

10- Confinement area.
11- Pillar ready to receive the composite casing.

INTERVENANTS DU PROJET

MAÎTRE D'OUVRAGE : Evian Resort

ASSISTANT MAÎTRE D'OUVRAGE : Auris

ARCHITECTE MANDATAIRE : Chatillon et associés

BUREAU D'ÉTUDES STRUCTURES (MOE) : Esba

CONSULTANT BÉTON (MOE) : Palmer Consulting

CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Apave

ENTREPRISE GÉNÉRALE : Eiffage Construction - Rhône

ENTREPRISE SPÉCIALISÉE TRAVAUX DE RENFORCEMENT : Resirep

BUREAU D'ÉTUDES TRAVAUX DE RENFORCEMENT : Eiffage TP - Direction des Moyens d'Ingénierie

ABSTRACT

RENOVATION OF THE HOTEL ROYAL ON THE SHORES OF LAKE LEMAN

YANNIS TORNERO, RESIREP - LECKMAN JOWAHEER, RESIREP - ALAIN SIMON, EIFFAGE TP - AMANDINE DE BARBA, EIFFAGE TP - LUC DEFAUCHEUX, EIFFAGE TP

The Hotel Royal located in Evian-les-Bains is undergoing a complete renovation. A detailed investigation campaign established a precise diagnostic of the various components of the building's loadbearing structure: the beams, pillars and slabs of the various levels. Based on this diagnostic and considering the new loads carried to the ground under the renovation project, various strengthening solutions were proposed by the contractor in response to the various situations on a case-by-case basis. These solutions include dry and wet shotcreting, composite materials with a carbon fibre base, in the form of straight or pre-shaped pultruded elements, or else in the form of fabrics to be impregnated on site. □

REFORMA DEL HOTEL ROYAL EN LAS ORILLAS DEL LEMÁN

YANNIS TORNERO, RESIREP - LECKMAN JOWAHEER, RESIREP - ALAIN SIMON, EIFFAGE TP - AMANDINE DE BARBA, EIFFAGE TP - LUC DEFAUCHEUX, EIFFAGE TP

El Hotel Royal situado en Evian-les-Bains es objeto de una reforma completa. Una campaña de investigación detallada permitió realizar un diagnóstico preciso de los diferentes elementos que constituyen la armadura resistente del edificio: las vigas, los postes y las baldosas de los diferentes niveles. En base a este diagnóstico y teniendo en cuenta las nuevas reducciones de cargas del proyecto de reforma, la empresa ha propuesto diferentes soluciones de refuerzo para responder, caso por caso, a las diferentes situaciones. Algunas de estas estas soluciones son el hormigón proyectado por vía seca o húmeda y los materiales compuestos a base de fibras de carbono, en forma de pultrusionados rectos o preformados o, incluso, en forma de tejidos para impregnar in situ. □



© CHRISTOPHE LEVILLAIN PHOTOGRAPHE

L'ART DU DIAGNOSTIC DE COMPORTEMENT ET D'ÉTAT APPLICABLE AUX OUVRAGES D'ART EN MAÇONNERIE

AUTEUR : JEAN-PIERRE LEVILLAIN INGÉNIEUR CONSEIL EN PATHOLOGIE, DIAGNOSTIC ET RÉPARATION DES OUVRAGES MAÇONNÉS, GÉRANT DE JPLCONSEIL

DANS LE CADRE DE LA SURVEILLANCE DES OUVRAGES D'ART ANCIENS EN MAÇONNERIE, DES DISTINCTIONS SONT À FAIRE ENTRE LE RENDU DES INSPECTIONS DÉTAILLÉES, LE PRÉDIAGNOSTIC ET L'ÉTABLISSEMENT DU DIAGNOSTIC DE COMPORTEMENT ET D'ÉTAT QUI EST À EFFECTUER POUR LEUR APPLIQUER DES TRAVAUX DE RESTAURATION ADAPTÉS ET EFFICIENTS. UN NOUVEAU MÉTIER EST À INVENTER : EXPERT EN DIAGNOSTIC SUR OUVRAGES D'ART EN MAÇONNERIE.

INTRODUCTION

Depuis près d'un siècle, on ne construit plus d'ouvrages totalement en maçonnerie ni, depuis plus de soixante-dix ans, d'ouvrages mixtes en béton à parement en moellons maçonnés.

La technique de conception des ponts-voûtes en maçonnerie, la construction des murs en maçonnerie de pierres sèches ou hourdées et les procédés d'exécution des ouvrages fluviaux et portuaires en maçonnerie ne sont plus

enseignés depuis plus de soixante ans. Cette disparition de l'enseignement de la construction en maçonnerie est la conséquence de leur abandon comme technique d'exécution des ouvrages. Le matériau béton puis le béton armé

et le béton précontraint ainsi que l'acier ont supplanté totalement ce procédé. Les ouvrages en maçonnerie, maintenant anciens, ont comme particularité commune d'avoir été construits au cours des XVIII^e et XIX^e siècles pour la



future par des travaux de restauration inadaptés ?

Comme le précise Madame Hélène Abel dans son éditorial de la revue Travaux de janvier-février 2014, « l'usage crée la valeur », un système performant de gestion des ouvrages d'art a été mis en place à la suite de l'effondrement du pont de Tours en avril 1978.

L'efficacité des dispositions adoptées est reconnue de tous. Les compétences et les méthodes de gestion des ouvrages d'art ont fortement progressé. Les maîtres d'ouvrage sont cependant inquiets des réponses apportées par nombre de bureaux d'études.

En effet, pour répondre à toutes les questions qu'il se pose, le gestionnaire trouve de très nombreux bureaux d'études. Ces bureaux s'engagent à partir de dossiers présentant de nombreuses photos, des plans schématiques et des désordres plus ou moins justifiés. Ils dressent ce qu'ils appellent un diagnostic des ouvrages et recommandent des travaux de réparation sans réaliser une analyse ni une justification sérieuses. Ces travaux sont issus d'un catalogue de techniques potentielles permettant de pallier ce qui leur apparaît comme des déficiences apparentes mais qui, très souvent, ne sont pas réellement avérées.

Cet article propose une amélioration de la situation pour que le diagnostic porté sur un ouvrage dans sa globalité soit efficace et fiable. On propose un complément au cursus de formation des agents pour devenir experts en diagnostic sur ouvrages d'art en maçonnerie.

MÉTHODE DE GESTION DES OUVRAGES D'ART

Dès 1979 les services techniques de l'Etat par l'intermédiaire du SETRA, du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et des laboratoires régionaux établissaient des documents de référence comme « Ponts en maçonnerie » et « Fondations de ponts en maçonnerie - guide pour la surveillance et le confortement » (figure 2).

L'instruction technique du 19 octobre 1979 et ses fascicules sont remplacés par la nouvelle Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art ITSEOA en date de décembre 2010. Ces documents applicables par les services de l'état sont utilisés assez largement par les gestionnaires d'ouvrages en infrastructures des transports et, par extension, aux gestionnaires d'un patrimoine fluvial et maritime (figure 3).

plupart d'entre eux et certains encore au début du XX^e siècle.

Par leur grand nombre et par leur utilité ils assurent une fonction essentielle de la vie sociale et de la vie économique du pays. Ils contribuent depuis plus d'un siècle et demi au fonctionnement de l'économie nationale et ils constituent une part majeure du patrimoine social. Par leur architecture vouée pour les ponts et par leurs matériaux typiques du secteur géographique, ces ouvrages contribuent fortement à l'élégance et la beauté des paysages de nos régions. Ces éléments du patrimoine doivent être conservés en état tout en assurant leur service d'usage. Il est admis que le coût économique de leur reconstruction serait inacceptable pour la collectivité. Les ingénieurs qui étaient responsables de leur construction ne se posaient pas la question de leur durée de vie. Ils les construisaient avec les meilleurs matériaux disponibles et pour un coût adapté aux conditions économiques locales. Ces ouvrages en maçonnerie sont-ils construits pour durer ? Quand on observe leur longévité on est conduit à considérer qu'effectivement ce sont des ouvrages intemporels. Ils sont de véritables témoins du développe-

1- Pont du Gard - travaux d'entretien par remplacement des pierres.

2- Guides techniques sur les ponts en maçonnerie.

3- Fascicules de gestion des ouvrages d'art.

1- Pont du Gard bridge - maintenance work by replacing stones.

2- Technical guides on masonry bridges.

3- Engineering structure management texts.

ment durable tant leur longévité est réelle sans que les gestionnaires ne procèdent à un entretien très régulier pendant plusieurs dizaines d'années. Dans son avant-propos au livre blanc

de l'IDRRIM d'octobre 2014, Monsieur Yves Krattinger, son président, rappelle que le magnifique Pont du Gard, loué pour ses qualités techniques et architecturales, construit il y a plus de 2000 ans et toujours debout, masque une réalité cruelle. Il a fait l'objet au cours de sa très longue vie d'investissements importants pour son entretien (figure 1).

Notre patrimoine d'ouvrages en maçonnerie nécessite des travaux d'entretien et de restauration pour éviter des pathologies sous les sollicitations nombreuses qui viennent les aggraver. Comment conserver ces ouvrages en sécurité vis-à-vis de l'utilisateur, comment assurer leur pérennité dans leur comportement et dans leurs matériaux, comment améliorer leur portance dans le cas de l'augmentation substantielle des charges appliquées ? Quels travaux d'entretien ou de restauration adaptés à chacun de ces ouvrages uniques faut-il prévoir d'exécuter pour leur conserver ou améliorer leur état et leur tenue dans le temps ? À quel coût au plus juste le gestionnaire devra-t-il engager les travaux lui permettant de conserver son patrimoine en sécurité sans provoquer, ce qui serait grave, sa destruction



4

© J.-P. LEVILLAIN

Les enjeux majeurs des maîtres d'ouvrage et des gestionnaires sont la recherche de la pérennité du bien commun que constitue le patrimoine existant sans reporter sur les générations futures des investissements lourds. L'instruction technique donne le cadre. Elle fixe les objectifs, elle propose les étapes des interventions de la gestion, elle codifie les interventions et fait appel à une terminologie.

Le gestionnaire doit connaître les enjeux locaux dans les domaines socio-économiques et culturels, ainsi que les contraintes d'environnement, les contraintes d'exploitation et de sécurité. La politique de gestion vise ainsi deux objectifs principaux :

- Préserver le patrimoine en optimisant les moyens techniques, humains et financiers ;
- Maintenir l'état fonctionnel pour assurer le niveau de service et le niveau de sécurité pour l'utilisateur.

Le gestionnaire dispose de plusieurs méthodes de surveillance mises au point et largement utilisées. Elles sont toutes basées sur une observation attentive des ouvrages.

LA SURVEILLANCE ET L'IMAGE QUALITÉ OUVRAGE D'ART

Les recueils de documents publiés en 1996 sur l'Image Qualité Ouvrage d'art sont à la disposition des gestionnaires. Ils permettent aux gestionnaires de quantifier par une note l'état apparent

des ouvrages d'art. Il s'agit essentiellement, dans l'objectif de ceux qui ont élaboré les fascicules, d'un outil de gestion qui permet à du personnel formé à l'observation et au relevé de dresser un état apparent et chiffré de l'ouvrage. Le travail consiste à rechercher et à relever des désordres apparents lors d'une visite, sans mettre en œuvre de moyens particuliers.

Toutes les anomalies pouvant se présenter sur le parement de chacune des parties de l'ouvrage sont répertoriées dans des catalogues. Chacune des anomalies est affectée d'une note qui sera compilée pour conduire à une notation. La cote définit le degré de dégradation de l'ouvrage et un symbole U définit le degré d'urgence.

MÉTHODE DE VISITE SIMPLIFIÉE COMPARÉE (VSC)

C'est une méthode de gestion d'un patrimoine d'ouvrages associant gestion technique et stratégique.

La méthode VSC repose pour sa partie technique sur une inspection réalisée sans mettre en œuvre de moyens particuliers, sans mesure ni prélèvement, mais avec, le cas échéant, une inspec-



5

© J.-P. LEVILLAIN

4- Désordres dans la géométrie d'un pont suite au tassement des appuis.

5- Désordres dans la géométrie d'un môle par gonflement des mortiers.

4- Geometric defects on a bridge following settlement of the supports.

5- Geometric defects on a mole due to mortar swelling.



© J.-P. LEVILLAIN
6

6- Fracture longitudinale dans une voûte.
7- Fissure sur tympan au-dessus des naissances.
8- Recherche de cavité dans une assise massive de maçonnerie.

6- Longitudinal fracture in an arch.
7- Crack on spandrel above arch springings.
8- Search for cavities in a massive course of masonry.



7



© J.-P. LEVILLAIN
8

tion subaquatique pour disposer d'une observation des éléments immergés. L'inspection est effectuée par un expert dans le domaine de l'ouvrage examiné. Allant à l'essentiel, l'expert va attribuer un indice d'état mécanique résultant de son analyse de la structure et de son environnement et un indice d'usage caractérisant la sûreté de fonctionnement.

Couplé à un indice stratégique qui est établi par le gestionnaire pour caractériser l'importance de son ouvrage par rapport aux autres dans son patrimoine, ces différents indices permettent de disposer de critères d'évaluation prenant en compte les enjeux économiques, politiques et financiers.

Nécessitant l'intervention d'un expert du domaine, la méthode permet, sur le plan technique, de réaliser un pré-diagnostic fiable de comportement et d'état apparent de l'ouvrage.

Elle sera la base d'une intervention future d'inspection détaillée et d'étude de diagnostic de comportement et d'état.

L'INSPECTION DÉTAILLÉE - ÉLÉMENT ESSENTIEL DE LA GESTION DES OUVRAGES

L'inspection détaillée est la base de la connaissance nécessaire à la surveillance des ouvrages d'art.

Elle permet au gestionnaire de disposer sur chacun de ses ouvrages d'art

d'un document de contrôle lui présentant et lui décrivant l'état apparent et lui permettant de suivre son évolution. Ce document lui permet de réaliser en temps utile les opérations d'entretien nécessaires à la bonne conservation en état de service ou de prévoir des opérations complémentaires d'auscultations ciblées et d'étude de diagnostic de comportement et d'état ou encore de déclencher et mettre en œuvre, si besoin, les mesures à prendre pour assurer la sécurité de l'utilisateur.

L'inspection détaillée est un élément décisionnel fort pour le gestionnaire puisqu'elle va lui donner les arguments de choix dans sa politique de gestion. Son rapport est un document opérati-

onnel de base pour servir aux opérations de surveillance et d'entretien. L'inspection a pour objet de rechercher les anomalies apparentes sur un ouvrage d'art.

Ces travaux sont précisés dans le fascicule de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art de décembre 2010 ainsi que dans le fascicule particulier Ponts et viaducs en maçonnerie de juin 1981.

Ce dernier présente des notions sur la nature et les causes des désordres, sur la surveillance et sur l'entretien et la réparation.

Il convient de s'y reporter pour prendre connaissance des dispositions spécifiques de surveillance.



9 © SAIF CA

S'agissant d'établir des documents servant de base de référence à la gestion des ouvrages d'art l'inspection doit être réalisée par du personnel qualifié, Inspecteur d'Ouvrages ou Agent d'Inspection selon la formation et le niveau. Le rapport d'inspection détaillée doit être complet avec une description et un relevé exhaustif de l'examen de toutes les parties.

Sur les plans d'inspection, la cartographie complète des désordres est à reporter à l'échelle sur un relevé précis de l'ouvrage et avec les dimensions des défauts observés.

Conformément à l'instruction le rapport doit comporter deux parties :

- La rédaction du procès-verbal d'inspection détaillée comportant la description de la structure et de son fonctionnement et le relevé exhaustif des désordres ;
- Une conclusion sous forme de pré-diagnostic qui examine l'évolution par rapport à des inspections antérieures, qui analyse et recherche l'origine des désordres constatés et qui envisage les suites à donner sous forme d'entretien courant, d'auscultations ciblées et d'étude de diagnostic de comportement et d'état.

Ses recommandations ne peuvent porter que sur des mesures portant sur l'entretien courant permettant de maintenir l'ouvrage en bonne santé et sur des travaux d'entretien spécialisé.

L'auteur n'a pas accès au dossier de l'ouvrage dans sa globalité et il ne traite pas de tous les aspects nécessaires à l'établissement du diagnostic permettant d'évaluer correctement les « risques encourus » et d'établir un pronostic.

Pour établir un diagnostic, le dossier d'ouvrage doit nécessairement être consulté et des auscultations sont souvent indispensables pour confirmer les risques apparus suite aux désordres relevés sur les structures.

Il y a très souvent confusion entre le constat effectué sur l'ouvrage et le terme diagnostic. Dans les rapports d'inspection on trouve un chapitre

9- Érosion des alluvions du lit en amont et au pourtour des piles.

10- Altération des moellons et perte d'épaisseur.

9- Erosion of alluvia in the upstream river bed and around the piers.

10- Damage to quarry stones and loss of thickness.

diagnostic qui n'est en réalité que le constat avec le relevé des désordres. La phase essentielle du prédiagnostic complet est absente faute d'effectuer une analyse.

LA RECHERCHE DE L'ÉTAT DES OUVRAGES

Des manquements apparaissent dans les rapports d'inspection détaillée. Ils peuvent se résumer en trois points essentiels :

- Défaut d'une observation d'ensemble des géométries des ouvrages et d'un relevé de l'environnement ;
- Défaut de hiérarchisation des désordres relevés dont les fissures et fractures. Elles sont rarement décrites, pas plus qu'il n'est précisé si elles sont récentes ou anciennes, vivantes ou mortes, évolutives.
- Défaut d'identification et de relevé des matériaux constitutifs de l'ouvrage en maçonnerie.

Ces divers manquements compromettent la compréhension du fonctionnement des ouvrages et l'appréciation de leur état. Cela conduit à ne pas savoir ce qui est relatif à des désordres normaux de fonctionnement mécanique et ce qui serait relatif à des anomalies de fonctionnement. Il faut que l'observateur et/ou le rédacteur de l'inspection sache distinguer les fissures normales de fonctionnement des ouvrages des autres fissures !



© J.-P. LEVILLAIN

10

Pour juger de l'importance des dégradations mécaniques sur un ouvrage, il est nécessaire :

- De connaître le fonctionnement de l'ouvrage que l'on observe et, pour les ponts, de connaître le fonctionnement des voûtes ;
- De savoir repérer et observer les zones et sections critiques ;
- De connaître les moyens d'auscultation et de surveillance.

Le type de désordre qui va apparaître sur un ouvrage d'art est directement issu du type de fonctionnement de la structure sous les différentes sollicitations. C'est l'analyse du fonctionnement qui va permettre de différencier :

- Les désordres visibles sur la structure occasionnés par un mauvais fonctionnement des appuis ;
- Les désordres dus à une insuffisance de résistance des matériaux de la structure ;
- Les désordres apparents mais qui sont relatifs à un fonctionnement correct comme les fissures d'articulation des voûtes ou de dilatation - retrait de tous les matériaux.

LE DIAGNOSTIC DE COMPORTEMENT ET D'ÉTAT

Aux méthodes de gestion du patrimoine bien adaptées à la surveillance et à l'entretien courant, il convient d'ajouter les études techniques de diagnostic qui permettront de remettre en état de sécurité les ouvrages en maçonnerie tout en leur garantissant leur pérennité. Le terme diagnostic vient du grec et

il signifie « CONNAISSANCE ». Le diagnostic est la partie de la médecine qui consiste à connaître les maladies et à les distinguer les unes des autres. C'est une opération d'analyse et de synthèse. De même, sur les ouvrages de génie civil, le diagnostic que nous complétons des termes de comportement et d'état consiste à dresser l'état des connaissances relatives à l'ouvrage, à connaître ses pathologies propres à sa structure pour les distinguer et pouvoir les traiter. Comme en médecine, les difficultés se présentent dans l'établissement du diagnostic en raison de la multiplicité des anomalies apparentes, de l'insuffisance de renseignement, de la sagacité et de l'attention à porter à l'analyse. Le seul moyen est de procéder avec une scrupuleuse exactitude et de ne négliger aucune présence d'anomalie si incohérente qu'elle paraisse dans l'analyse. Le diagnostic, par la culture des connaissances vraies des ouvrages anciens et une analyse sérieuse basée sur la connaissance des comportements des structures, permet le traitement objectif d'un grand nombre de pathologies sur ouvrages d'art dont les ouvrages voûtes en maçonnerie.

11- Le matériel du formateur.

11- The trainer's equipment.

LES ÉTAPES DU DIAGNOSTIC DE COMPORTEMENT ET D'ÉTAT

Les étapes de l'élaboration du diagnostic de comportement et d'état se déclinent en six connaissances :

- Connaissance de l'ouvrage en l'identifiant par son nom, par son âge, son histoire, sa géométrie et son environnement. L'ouvrage n'est pas isolé. C'est également le sol au pourtour, la rivière avec son régime d'écoulement et de variation du niveau d'eau, qui participent à ce que l'on désigne par ouvrage.
- Connaissance historique qui doit permettre de retrouver en partie ou en totalité les plans, les modes de parcours, les traitements déjà effectués et de reconstituer l'histoire des désordres. Cette enquête est indispensable, peu coûteuse, toujours intéressante et elle apporte le plus souvent des éléments instructifs et très utiles pour la suite des opérations.
- La connaissance de l'évolution historique des techniques de construction des fondations et des structures comme les recherches et expériences sur les liants à la chaux puis au ciment ou les améliorations des techniques de construction des fondations et des structures est indispensable. L'origine initiale de l'effondrement du pont de Tours en avril 1978 provient de la modification du chenal de la Loire qui au XIX^e siècle est transféré en

rive gauche face à la ville de Tours. Les piles de la rive gauche avaient été édifiées à sec sur les bancs de sable sans contreventement et non, comme en rive droite alors en eau, sur un pilotis contreventé.

- Connaissance du comportement structurel de l'ouvrage. Il s'agit, à partir d'une observation visuelle ou d'une reprise d'une inspection détaillée, d'analyser les informations recueillies sur site et regroupées selon trois thèmes. Ils permettent de dresser un prédiagnostic de comportement structurel. Ils sont à relever successivement et indépendamment les uns des autres lors d'une inspection visuelle.

- Déformées dans la géométrie de l'ouvrage. Il s'agit de mettre en évidence toutes les anomalies apparentes dans les éléments structuraux et les fondations et leur position. Ce sont des anomalies apparentes dans les parements sous forme de défauts dans les niveaux altimétriques, les horizontalités, les planités, les fruits des parements, etc. Un levé topographique complet permet de compléter et de confirmer les observations visuelles. Dans ce thème, l'absence de déformée dans les structures est à signaler (figures 4 et 5).

- Recherche des fissures et fractures et plus globalement des zones de rupture. Les fissures ou les fractures ne se positionnent ▷





12

© CHRISTOPHE LEVILLAIN PHOTOGRAPHE

jamais au hasard ; elles correspondent à un excès de contrainte pour la structure analysée et pour l'état de celle-ci ou à des arrachements par écartement de blocs (figure 6). Le comportement fissuré est propre aux ouvrages en maçonnerie. Il faut donc apprécier les fissures conformes au bon fonctionnement de l'ouvrage qui résultent de sollicitations normales comme l'action des charges ou des dilatations (figure 7).

- Désordres dans l'environnement. Il s'agit de mettre en évidence des défauts de comportement dans l'environnement proche et lointain de l'ouvrage, que ce soient les sols au pourtour des appuis, les protections, les berges, le lit en général, les remblais adjacents, les voiries et leur revêtement (figure 8). Le levé des fonds, leur nature font partie des observations nécessaires à la connaissance (figure 9),

→ Connaissance des conditions hydrauliques et des affouillements dus à l'écoulement au droit des appuis du pont, en recherchant les situations à risque et le comportement morphologique du lit. Si un minimum de connaissance est nécessaire, souvent une observation et un sondage avec une perche

apportent une base suffisante d'appréciation des risques.

→ Connaissance des conditions de fondation des appuis. Elle nécessite, après avoir daté l'ouvrage, de savoir comment on construisait les fondations à cette époque et dans cette région. Les livres sur les cours de construction du XVIII^e et XIX^e siècle sont une source d'information précieuse. L'auscultation interne par sondages et essais est un élément fondamental de cette recherche.

→ Connaissance des matériaux constitutifs par leur identification : ce thème examine en particulier la nature et l'origine des matériaux, leur identification, leur état apparent et une approche de l'altération (figure 10).

→ Connaissance d'usage : elle est apportée par le gestionnaire qui doit s'assurer du respect des règles d'usage et que la sécurité des usagers est assurée. Elle est complétée par la fonction stratégique de l'ouvrage dans l'économie locale ou générale.

L'établissement du diagnostic de comportement et d'état consiste à réaliser une analyse du comportement permettant d'expliquer les déformations, les ruptures et leurs positions, ainsi qu'un recalcul de l'ouvrage afin de justifier ou non les dispositions adoptées dans ses

12- Pont médiéval du Haut Aragon de Albarda.

12- Medieval bridge of Albarda in the Upper Aragon.

divers éléments constitutifs et les différentes stabilités ainsi que les différentes sécurités correspondantes.

L'analyse technique de la résistance mécanique des différents niveaux de la structure et des fondations doit permettre de répondre aux questions suivantes :

→ Dans quel état mécanique est l'ouvrage et quelles sécurités présentent les divers éléments constitutifs ?

→ Quels sont les risques encourus tant par la structure et ses éléments constitutifs que par les fondations ? Comment se situent les charges appliquées par rapport aux résistances des structures et des sols ?

→ Les équipements techniques répondent-ils aux exigences de résistance, aux normes et aux règlements en vigueur ?

UN NOUVEAU MÉTIER ?

Pour des raisons financières de compétitivité entre bureaux d'étude et de rapidité d'exécution, on a actuellement en usage des systèmes binaires de simplification de la surveillance des ouvrages avec des fiches informatiques à remplir où il y a deux réponses : **oui - non !** Cette évolution d'établissement des avis sur l'état apparent et la sécurité des ouvrages peut sans doute être suffisante pour une surveillance régulière d'ouvrages maçonnés bien construits, peu sollicités par leur environnement, déjà bien connus et sur lesquels un diagnostic sérieux de comportement et d'état est déjà établi. Pour des ouvrages dans un contexte naturel plus agressif et pour des ouvrages où manque le dossier d'ouvrage parce qu'il n'est pas encore établi, l'inspection détaillée actuellement pratiquée est seulement un élément de l'étude qui ne doit pas conduire ses auteurs à des recommandations inappropriées de travaux.

Le grand « principe de précaution », actuellement mis en avant et exploité par des ingénieurs non formés aux maçonneries, conduit à des recommandations de travaux de renforcement structurel totalement inutiles aux ouvrages. Ces travaux sont proposés en l'absence de considérations raisonnables sur des risques mal évalués faute de connaissance du comporte-



ment du matériau maçonnerie et du comportement des voûtes.

Le même constat pourrait être formulé sur les dossiers d'études géotechniques des sols de fondation des ouvrages en maçonnerie basés sur la mission classée G5 de la norme. Les synthèses de ces dossiers de diagnostic géotechnique conduisent toutes à reconnaître des sols de fondation de médiocre qualité sans une justification raisonnable. Sans avoir évalué les descentes de charge, car les calculs de celles-ci sont hors de la mission, il est conclu à la nécessité de travaux de reprise en sous-œuvre des fondations. Ces travaux préconisés, toujours très orientés vers la mise en œuvre d'éléments métalliques scellés, sont très souvent inutiles et inappropriés.

Notre proposition d'amélioration de cette situation porte sur la formation

des ingénieurs intervenant comme sachants. Les thèmes de formation à développer seraient :

- Faire comprendre ce qu'est un diagnostic de comportement et d'état, un prédiagnostic visuel établi à la suite d'une inspection et la différence avec le constat établi lors d'une inspection détaillée ;
- Faire acquérir aux futurs inspecteurs

13- Pont du Diable à Ceret sur le Tech, du XIV^e siècle.

13- Pont du Diable bridge at Ceret, over the Tech, 14th century.

(et aux anciens également) des notions assez poussées de comportement structurel des ouvrages d'art dont les ouvrages voûtés en maçonnerie (figure 12) ;

- Apporter des connaissances minimales sur le matériau maçonnerie ;
- Apporter des connaissances historiques sérieuses sur les techniques de construction des fondations et des ouvrages sur les trois siècles les plus importants de construction des ouvrages en maçonnerie (figure 11) ;
- Apporter des connaissances minimales en hydraulique fluviale, sur la morphologie des rivières et sur les formations des affouillements.

Nous n'avons plus les ingénieurs audacieux des XVIII^e et XIX^e siècle mais nous disposons des ouvrages didactiques

de formation qu'ils écrivaient pour leurs jeunes successeurs. Nous pouvons prendre connaissance de leur culture sur la maçonnerie permettant d'analyser le comportement des ouvrages sans les avoir dimensionnés ni participé aux expériences ou aux constructions. Mais leur acquis reste accessible à qui veut bien se former. S'il a fallu des artistes et des ingénieurs compétents pour construire les ouvrages en maçonnerie, il en faut également pour assurer leur sauvegarde. L'expression « Art de l'Ingénieur » y prend tout son sens (figure 13). Ces ingénieurs sont à former. Les travaux d'étude portant sur l'élaboration du diagnostic complet de comportement et d'état des ouvrages correspondent à un nouveau métier d'ingénieur. Pour pallier les insuffisances actuelles, il nous faut créer ce nouveau métier ! □

ABSTRACT

THE ART OF BEHAVIOUR AND CONDITION DIAGNOSIS APPLICABLE TO MASONRY ENGINEERING STRUCTURES

JEAN-PIERRE LEVILLAIN, JPLCONSEIL

For the monitoring of old masonry engineering structures, distinctions should be made between detailed inspections, preliminary diagnosis and establishment of the behaviour and condition diagnostic to be performed in order to carry out appropriate, efficient restoration works on them. A new job should be invented: expert in diagnosis of masonry engineering structures. □

EL ARTE DEL DIAGNÓSTICO DE COMPORTAMIENTO Y DE ESTADO APLICABLE A LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA

JEAN-PIERRE LEVILLAIN, JPLCONSEIL

En el marco de la vigilancia de las estructuras de fábrica antiguas, se debe hacer una distinción entre el resultado de las inspecciones detalladas, el pre-diagnóstico y el establecimiento del diagnóstico de comportamiento y de estado que se debe realizar para aplicarlos a obras de restauración adaptadas y eficientes. Se debe crear una nueva profesión: especialista en diagnóstico de estructuras de fábrica. □

RÉHABILITATION D'UN DÉPÔT DE RÉSIDUS POLLUÉS, PAR CONFINEMENT AVEC GÉOSYNTHÉTIQUES ET RÉDUCTION DES GES

AUTEURS : FRANÇOIS CARTAUD, RESPONSABLE D'ACTIVITÉ, EGIS WASTE MANAGEMENT - CATHERINE JATTEAU, DIRECTRICE EGIS WASTE MANAGEMENT

LE TRAITEMENT DES RÉSIDUS INDUSTRIELS POLLUÉS EST SOUVENT ABORDÉ SELON L'ANGLE DE LA CHIMIE, CE QUI ORIENTE LEUR MODE DE GESTION VERS L'ÉVACUATION EN FILIÈRES DISTANTES. DANS LE CAS PRÉSENT, IL A ÉTÉ PRÉFÉRÉ DE CONFINER LA SOURCE DE POLLUTION IN SITU, EN TRANSPOSANT LES TECHNIQUES HABITUELLEMENT EMPLOYÉES EN INSTALLATIONS DE STOCKAGE DE DÉCHETS. LE GAIN EN TERMES D'ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE EST POSITIF, TOUT EN APPORTANT DE FORTES GARANTIES ENVIRONNEMENTALES.



1a



1b

INTRODUCTION

Ce site industriel de 10 ha, situé dans la région Pays-de-la-Loire, est en exploitation depuis plusieurs décennies et a connu plusieurs propriétaires successifs jusqu'à l'exploitant actuel. Il a produit, au fil du temps, d'importantes quantités de résidus et coproduits issus du process industriel, lequel ne sera pas détaillé ici. Ces résidus, de granulométrie variable, ont été mis en stock sommairement par le précédent exploitant sur une parcelle voisine (d'une surface d'environ 4 ha) sans dispositions particulières, après un simple décapage de terre végétale et de la frange d'altération surmontant un horizon schisteux.

**1a & 1b-
Terrassement
du casier (1a)
après déplacement
des stocks de
résidus sur l'alvéole
"Ouest"
(1b).**

**1a & 1b-
Earthworks
on the containment
cell (1a)
after shifting
stored residues
to the "West"
cell (1b).**

LES DIFFÉRENTS SCENARI DE DÉPOLLUTION ENVISAGÉS - CONSIDÉRATIONS ENVIRONNEMENTALES

Lorsque la présomption d'impact produit par le lessivage des résidus sur les eaux souterraines a été avancé par des riverains, les services de la DREAL ont exigé le déclenchement de plusieurs démarches : la caractérisation immédiate des résidus et polluants et leur impact sur les eaux, la mise en place de campagnes de suivi de qualité des eaux souterraines, l'élaboration d'un plan de gestion.

Par l'application de la méthodologie désignée dans la circulaire ministérielle

du 8 février 2007 intitulée « Sites et sols pollués - Modalités de gestion et de réaménagement des sites pollués », le premier schéma conceptuel élaboré en 2011 prévoyait le déblaiement de tous les résidus de la parcelle, leur chargement et leur évacuation vers l'ISDND la plus proche, distante d'une dizaine de kilomètres environ. Le volume important de matériaux (de l'ordre de 35 000 m³), leur masse volumique élevée (d~3) induisaient *de facto* de nombreuses rotations de poids-lourds. L'impact environnemental du transport routier est bien connu et les concepteurs sont maintenant très sensibles, dans leurs approches, au développement durable

et à la lutte contre le réchauffement climatique par émission des gaz à effet de serre. Sans que l'impact carbone ait été quantifié dans ce cas précis, le bilan des émissions engendrées par le transport routier comparé à celui lié à une solution technique n'impliquant pas d'évacuation de matériaux ne laissait que peu de doutes sur le bien-fondé environnemental.

Il a ainsi été proposé à l'industriel (Egis, 2012), comme à l'Inspection des Installations Classées, un scénario alternatif pour lequel les matériaux ne seraient

pas évacués, mais gérés *in situ* de manière à ce que le vecteur de diffusion des polluants vers l'environnement soit supprimé par isolement de la source. Plusieurs possibilités techniques s'offrent pour gérer une source de pollution : stabiliser les polluants présents pour empêcher leurs voies de migration (lixiviation, poussières) vers les milieux récepteurs, capter ou piéger les polluants lors de leur migration (mécaniquement, chimiquement), confiner les polluants. Ces techniques n'étant bien entendu pas toutes

applicables à chaque cas d'étude. Le site industriel considéré disposait de plusieurs facteurs qui ont incité l'équipe Egis à retenir la solution technique du confinement :

- Une surface assez importante (donc des emprises disponibles pour des aménagements) ;
- Peu de contraintes interdisant des travaux ;
- Une topographie favorable ;
- Des ressources en matériaux géologiques sains, pouvant être réemployés.

Par ailleurs, d'autres avantages étaient présentés par cette alternative technique :

- La relative faible maintenance requise (au contraire des méthodes de captage, d'extraction ou de piégeage des polluants) ;
 - Un bon niveau de prédictibilité des coûts d'opération, puis de suivi.
- Enfin, le concepteur a choisi d'adopter un niveau de sécurité important sur l'efficacité du confinement par transposition des techniques employées en ISDND, argument reçu favorablement par l'Inspection des Installations Classées en charge de l'instruction du dossier. Rappelons par ailleurs que l'utilisation de géosynthétiques dans la gestion et la dépollution des sites a déjà été employée (Gisbert, 2009) tout comme dans les applications minières à enjeux environnementaux (Touze-Foltz et Lupo, 2009).

APPLICATION DES TECHNIQUES DE CONFINEMENT D'ISDND À LA CRÉATION DU CASIER DE RÉCEPTION DES RÉSIDUS INDUSTRIELS

La phase de conception, menée en 2012, a retenu les dispositions techniques de confinement - et de drainage des lixiviats - directement issues de l'application de l'Arrêté Ministériel du 9 septembre 1997 relatif aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés, modifié le 19 janvier 2006. Le confinement en fond et flancs du casier est ainsi assuré par la mise en œuvre des dispositifs suivants :

- Barrière d'étanchéité passive reconstituée par traitement à la bentonite des matériaux géologiques en place (limons d'altération du socle schisteux classés A2-h) sur une épaisseur de 50 cm, pour obtention d'un coefficient de conductivité hydraulique $K \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s ;
- Renforcement par géosynthétique bentonitique dosé à 5 kg/m² de coefficient de conductivité hydraulique $K \leq 1 \times 10^{-11}$ m/s (appliqué sur fond et flancs) ;
- Remontées latérales sur flancs de casier ($h = 2$ m au-dessus du niveau de la barrière passive de fond), épaisseur de 50 cm, au moyen des mêmes matériaux traités ;
- Barrière d'étanchéité active composée (de bas en haut) d'une géomembrane PEHD 2 mm certifiée Asqual, d'un géotextile de protection non-tissé aiguilleté de masse surfacique 600 g/m² certifié Asqual puis ▷



2- Mise en œuvre de la barrière passive reconstituée.
3a & 3b- Application de l'étanchéité par géosynthétiques et du niveau drainant.

2- Setting up the reconstructed passive barrier.
3a & 3b- Application of sealing by geosynthetic clay liners and the drainage level.



4



5

© EGIS

d'un massif drainant (matériaux granulaires 20/40 mm) sur 50 cm d'épaisseur parcouru de drains PEHD DN 110 mm.

On notera qu'une solution d'équivalence a été retenue, en appliquant les dispositions du « Guide de recommandation pour l'évaluation de l'équivalence en étanchéité passive d'ISD - version 2 - février 2009 » édité par le MEEDDAT, ainsi que les dernières prescriptions du BRGM (Guyonnet & al., 2009). Toutefois, l'industriel n'a pas souhaité appliquer le principe d'équivalence hydraulique en drainage du niveau perméable, qui aurait pu encore améliorer le bilan carbone de l'opération, comme l'ont mis en évidence Fourmont et Durkeim (2011).

La structure de couverture finale recouvrant les résidus une fois mis en place dans le casier a été conçue de manière à isoler la source, d'une part (fonction de confinement), et à évacuer les eaux météoriques, d'autre part (fonction de drainage), de manière à empêcher la lixiviation des polluants. Par ailleurs, cette structure devait conduire au développement ultérieur d'une végétation couvrante permettant l'intégration visuelle du site réhabilité dans son environnement (prairies et pâturages). La conception a retenu, toujours en raison de la disponibilité de matériaux sains dans les emprises du site, une structure de couverture composée des éléments suivants :

- Couche de confinement par limons argileux compactés sur une épaisseur de 40 cm, pour obtention d'un coefficient de conductivité hydraulique $K \leq 1 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$;
- Niveau de terre végétale permettant le développement rapide d'espèces herbacées, après ensemencement mécanisé. L'horizon de terre végétale appliqué est d'une épaisseur de 30 cm.

4- Déplacement des résidus vers le casier de confinement.
5- Modelage et lissage des résidus selon le profil de réaménagement final.

4- Shifting residues to the containment cell.
5- Residue modelling and smoothing according to the final reclamation profile.

Ces dispositions techniques, transposées des aménagements mis en œuvre en ISDND, ont été validées par l'Inspection des Installations Classées qui a jugé qu'elles apportaient un degré de sécurité suffisant pour la réhabilitation de ce site industriel. L'arrêté a donc repris ces préconisations techniques.

LES TRAVAUX DE RÉHABILITATION

Les travaux ont été conduits par Egis, dans son rôle de conception-réalisation sous la forme d'opération « clé en main » auprès de l'industriel. Deux contrats de sous-traitance ont été passés avec des entreprises.

Les terrassements ont été confiés à Egetra TP - Groupe Pigeon qui dispose d'un savoir-faire en terrassements généraux et réalisation de barrières passives.

Le lot « étanchéité par géosynthétiques » a été confié à EGC - Galopin, entreprise certifiée par Asqual pour la pose d'étanchéité par géomembranes. Le chantier débuta mi-avril 2014, pour une durée six mois.

TRAVAUX DE CONSTRUCTION DU CASIER

Les emprises du casier de confinement à construire étaient partiellement occupées par des stocks de résidus industriels, nécessitant un déplacement préalable des matériaux. Ces stocks ont donc été mis en dépôt provisoire sur la zone sud-ouest du site, en sur-

paisseur des résidus en place dans ce qui était dénommé l'« alvéole Ouest » (figures 1a et 1b).

Une fois l'arasement et la digue périmétrique du casier réalisés, la barrière passive a été mise en place, en appliquant un traitement à la bentonite de 1,5% après validation d'une planche d'essais préalable (figure 2). La perméabilité mesurée en barrière de fond et sur remontées latérales par le bureau de contrôle extérieur est située dans une gamme de valeur de $9 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ à $4 \times 10^{-10} \text{ m/s}$, respectant ainsi le critère défini par l'arrêté préfectoral.

La réception prononcée au vu des résultats du contrôle extérieur (coefficient de perméabilité et épaisseur), l'étanchéité EGC - Galopin est intervenu pour procéder à la pose des géosynthétiques. La protection du D.E.G a ensuite été appliquée - puis la mise en œuvre du niveau drainant en fond de casier (figures 3a et 3b).

DÉPLACEMENT DES RÉSIDUS POLLUÉS VERS LE CASIER

Les résidus ont été repris de leur lieu de dépôt (échelon de pelle mécanique et tombereaux) pour être stockés dans le casier préalablement aménagé, contrôlé et réceptionné. Durant l'opération de remplissage du casier, les lixiviats produits par l'essorage des résidus humides ont été collectés gravitairement vers une cuve étanche, via le réseau de drains-collecteurs PEHD DN 110 mm.

Lors de la mise en place des résidus dans le casier, un soin particulier a été apporté pour sélectionner les fractions les plus fines et les placer contre les flancs du casier, afin d'interdire tout contact du D.E.G avec des blocs anguleux de forte granulométrie de nature à endommager mécaniquement les géosynthétiques. La figure 4 illustre

PRINCIPALES QUANTITÉS

- MISE EN STOCK PROVISOIRE DE RÉSIDUS : 12 000 m³**
- DÉBLAIS/REBLAIS SUR ARASE DE CASIER : 4 400 m³**
- RÉALISATION DE BARRIÈRE PASSIVE EN LIMONS TRAITÉS BENTONITE : 3 000 m³**
- ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOSYNTHÉTIQUES : 7 600 m²**
- COUCHE DRAINANTE EN FOND DE CASIER (MATÉRIAUX GRANULAIRES) : 2 000 m³**
- DRAINS ET COLLECTEURS PEHD DN 110 mm : 220 m**
- DÉPLACEMENT DES RÉSIDUS VERS LE CASIER : 34 300 m³**
- MISE EN PLACE D'ARGILES EN COUVERTURE : 2 700 m³**
- TERRE VÉGÉTALE EN COUVERTURE : 2 200 m³**
- ENGAZONNEMENT : 6 800 m²**



6

© EGIS

le remplissage du casier lors du mouvement de matériaux.

Les talus et le dôme formés par les résidus (cubature d'environ 35 000 m³) ont été soigneusement lissés et modelés aux cotes et pentes de réaménagement, soit 3% transversalement pour garantir une évacuation des futures eaux météoriques (figure 5).

APPLICATION DE LA STRUCTURE DE COUVERTURE FINALE

La dernière phase des travaux de réhabilitation a consisté à mettre en place le dispositif de couverture. Les limons argileux classés A2-h disponibles sur site ont été mis en œuvre sur 40 cm en dôme comme en flancs, afin de constituer le niveau de confinement supérieur empêchant tout contact entre les résidus pollués et le milieu extérieur les eaux pluviales etc. (figure 6).

Le critère de perméabilité a fait l'objet de mesures par le bureau contrôle extérieur mandaté, tout comme l'épaisseur en tout point de la couverture a été vérifié par levés topographiques successifs. Après validation du respect des prescriptions réglementaires, le dispositif de couverture finale a reçu un niveau de terre végétale permettant

6- Mise en œuvre de la couche de limons pour constitution de couverture finale.

6- Placing the layer of silt to form the final covering.

le reverdissement du site réhabilité et son intégration paysagère dans l'environnement.

Pour finir, les eaux météoriques sont gérées par un réseau de fossés de collecte, en périphérie de la couverture, dirigeant les eaux vers un bassin étanche (par géomembrane PEHD 1,5 mm) d'une capacité de 650 m³, dimensionné pour contenir un épisode pluvieux de fréquence de retour décennale. La surveillance et l'entretien du site seront régulièrement assurés par l'industriel, selon le programme de

suivi environnemental et la fréquence d'analyses définis par l'arrêté préfectoral. À cet effet, une piste périphérique en matériaux stabilisés a été installée autour du casier de confinement et autour du bassin des eaux pluviales.

CONCLUSIONS

L'opération de réhabilitation des dépôts contaminés est originale du fait de la technique employée pour confiner la source, sans évacuation de matériaux du site. La particularité du projet réside dans la transposition quasi littérale des méthodes - et de la réglementation - usuellement appliquées pour le stockage des déchets ménagers et assimilés. Cette approche a permis de s'affranchir des incertitudes inhérentes au traitement de la source de pollution, tout en apportant un bénéfice certain en termes d'émission de gaz à effet de serre, avec un déplacement des résidus réduit au strict minimum. Les bénéfices environnementaux sont nombreux et l'emploi des géosynthétiques apporte une garantie de performance et de durabilité des aménagements réalisés grâce au retour d'expérience dont l'ingénierie dispose après plusieurs décennies de pratique. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

CONCEPTEUR ET PILOTE D'OPÉRATION GÉNÉRALE :

Egis, Egis Waste Management

BUREAU DE CONTRÔLE EXTÉRIEUR "PERMÉABILITÉ" : Geoscope

BUREAU DE CONTRÔLE EXTÉRIEUR "GÉOSYNTHÉTIQUES" : YGD Conseil

CONTRÔLE EXTÉRIEUR - GÉOMÈTRE : cabinet Arrondel

ENTREPRISE GÉNÉRALE DE TRAVAUX : Egis, Egis Waste Management

SOUS-TRAITANT LOT TERRASSEMENTS : Egetra - TP Groupe Pigeon

SOUS-TRAITANT LOT ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOSYNTHÉTIQUES : EGC - Galopin

ABSTRACT

REMEDICATION OF A CONTAMINATED RESIDUE DEPOSIT, BY CONTAINMENT WITH GEOSYNTHETICS AND MITIGATION OF GHG

EGIS WASTE MANAGEMENT : FRANÇOIS CARTAUD, CATHERINE JATTEAU

The industrial site in question contained a large deposit of contaminant residues, having a proven impact on the groundwater. Several scenarios were envisaged to eliminate the source of contamination, the first of which was removal of the residues to a non-hazardous waste storage facility. However, this removal operation would have required extensive road transport, producing greenhouse gas emissions. An alternative, more environmentally friendly scenario was chosen: in-situ containment of the source, by creating a containment cell pre-sealed by techniques derived from waste storage facilities. □

REHABILITACIÓN DE UN DEPÓSITO DE RESIDUOS CONTAMINADOS, POR CONFINAMIENTO CON GEOSINTÉTICOS Y REDUCCIÓN DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO

EGIS WASTE MANAGEMENT : FRANÇOIS CARTAUD, CATHERINE JATTEAU

El centro industrial considerado disponía de un importante depósito de residuos contaminantes, cuyo impacto sobre las aguas subterráneas se había puesto de manifiesto. Se contemplaron varios escenarios para eliminar la fuente de contaminación. En primer lugar la evacuación de los residuos hacia un circuito autorizado (Instalación de Almacenamiento de Residuos No Peligrosos). Sin embargo, esta operación de desplazamiento requería un importante transporte por carretera, fuente de emisiones de gases de efecto invernadero. Se ha adoptado un escenario alternativo, más respetuoso con el medio ambiente: el confinamiento in situ de la fuente, mediante la creación de un compartimento previamente estanqueizado según las técnicas procedentes de las instalaciones de almacenamiento de residuos. □



1 © PHOTO THEOQUE DADES

DIAGNOSTIC ET RÉHABILITATION DE 4 VIADUCS EXCEPTIONNELS DE TYPE EIFFEL

AUTEURS : CÉDRIC LAMARSAUDE, INGÉNIEUR CHARGÉ D'ÉTUDES, DIADÈS - RENAUD LECONTE, DIRECTEUR TECHNIQUE, DIADÈS - CHRISTOPHE RAULET, DIRECTEUR GÉNÉRAL, DIADÈS - CLAIRE DEFARGUES, DIRECTEUR DE PROJET, SETEC FERROVIAIRE

DANS LE CADRE DU PLAN RAIL AUVERGNE RÉALISÉ SOUS MAÎTRISE D'ŒUVRE SETEC, 4 VIADUCS FERROVIAIRES « EIFFEL » ONT FAIT L'OBJET D'ÉTUDES EXHAUSTIVES DE LEUR ÉTAT DE SANTÉ STRUCTURALE, 145 ANS APRÈS LEUR MISE EN SERVICE. LES TRAVAUX DE RÉGÉNÉRATION ET DE REMISE EN PEINTURE DU VIADUC DU ROUZAT ONT AINSI PU ÊTRE RÉALISÉS SUR CES BASES DANS LES DÉLAIS IMPARTIS DE FERMETURE DE LA LIGNE.



© STRUCTURAE



© PHOTOTHÈQUE DIADES



© PHOTOTHÈQUE DIADES



© PHOTOTHÈQUE DIADES

LE CONTEXTE

Dans le cadre du Plan Rail Auvergne signé entre l'État, la Région Auvergne et Réseau Ferré de France (RFF), d'importants travaux de rénovation des infrastructures ferroviaires - travaux de voie, d'ouvrages d'art, de tunnels et d'ouvrages en terre - ont été réalisés sous la maîtrise d'œuvre de Setec.

Ces travaux consistaient à sécuriser, moderniser ou remettre à niveau trois lignes ferroviaires auvergnates dont celle de Bordeaux-Lyon entre Montluçon et Gannat - lignes 705000 et 707000 -, notamment en supprimant et en prévenant de nombreux ralentissements.

La ligne de Montluçon-Gannat, ouverte en 1868, comprend quatre viaducs métalliques exceptionnels dont deux ont été réalisés par la jeune Compagnie Eiffel et les deux autres par la Compagnie de Fives-Lille.

PRÉSENTATION DES OUVRAGES

Le viaduc du Rouzat (figure 2) et le viaduc de Neuviel (figure 3), construits par Gustave Eiffel entre 1867 et 1869, se trouvent dans le département de l'Allier,

1- Relevés dimensionnels par travail acrobatique.

2- Vue générale du viaduc du Rouzat.

3- Vue générale du viaduc de Neuviel.

4- Vue générale du viaduc de Bellon.

5- Vue du viaduc de la Bouble.

1- Dimensional readings by acrobatic work.

2- General view of the Rouzat viaduct.

3- General view of the Neuviel viaduct.

4- General view of the Bellon viaduct.

5- General view of the Bouble viaduct.

sur la ligne à voie unique de Commentry à Gannat. Ils sont respectivement situés aux km 386.840 et 388.813, entre les gares de Gannat et Bellenaves.

Ces deux ouvrages sont inscrits à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques depuis 1965.

Le viaduc du Rouzat se situe sur le territoire de la commune de Saint-Bonnet-de-Rochefort. Il comporte 3 travées métalliques de 55,125 m - 57,75 m - 49,125 m prolongées par un viaduc d'accès en maçonnerie de 13 m environ côté Commentry. Le tablier en fer puddlé de 162 m de long repose sur deux piles composées chacune de 4 colonnes creuses en fonte d'une cinquantaine de centimètres de diamètre, munies de jambes de force ou arbalétriers dans le sens transversal et appuyées sur un massif en maçonnerie ; les parties métalliques des piles ont une hauteur respective de 46 et 41 m. La pile côté Commentry est fondée au milieu de la rivière la Sioule.

Le viaduc de Neuviel se situe quant à lui sur le territoire de la commune de Bègues. Il comporte 2 travées métal-

liques de 49,20 m prolongées par un viaduc d'accès en maçonnerie de 31 m environ côté Commentry et d'une travée annexe métallique de 23,50 m côté Gannat. Le tablier en fer puddlé de 98,40 m de long repose sur une pile composée de quatre colonnes creuses en fonte d'une cinquantaine de centimètres de diamètre et d'une hauteur de 41,50 m, appuyées sur un massif en maçonnerie.

Les tabliers de ces deux ouvrages présentent une largeur de 4,50 m entre garde-corps. Ils sont constitués de poutres latérales à treillis, d'une hauteur hors cornières de 4 m et un entre axes de 3,50 m. Des pièces de pont sont espacées de 3 m et supportent des longerons en acier qui ont été remplacés en 1965. Enfin, l'intérieur du tablier est équipé d'une passerelle fixe permettant son inspection.

Le viaduc du Bellon (figure 4) et le viaduc de la Bouble (figure 5), construits par Jean-François Cail et la compagnie Fives-Lille entre 1867 et 1869, sont également situés sur la ligne de Commentry à Gannat. ▶

Ils sont respectivement aux km 368.212 et 363.637, entre les gares de Louroux-de-Bouble et de Bellenaves. Les ouvrages se situent à cheval sur les territoires des communes de Louroux-de-Bouble et de Coutansouze pour le Bellon et de Louroux-de-Bouble et d'Echassières pour la Bouble.

Ces deux ouvrages sont inscrits à l'inventaire des monuments historiques naturels et des sites de caractère artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque du département de l'Allier depuis 1991.

Le viaduc du Bellon comporte 3 travées de 40 m - 48 m - 40 m encadrées par deux viaducs d'accès en maçonnerie de 57,80 m côté Commentry et 42 m côté Gannat. Le tablier en fer puddlé de 128 m de long repose sur deux piles composées chacune de 4 colonnes creuses en fonte d'une cinquantaine de centimètres de diamètre et appuyées sur un massif en maçonnerie ; les parties métalliques ont une hauteur de 36 m. Le viaduc de la Bouble comporte 6 travées de 50 m encadrées par deux viaducs d'accès en maçonnerie de



6 © GALILICA, BNF/FR - ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

71,30 m côté Commentry et 23,70 m côté Gannat. Le tablier en fer puddlé de 395 m de long repose sur cinq piles composées chacune de 4 colonnes creuses en fonte d'une cinquantaine de centimètres de diamètre, munies de jambes de force dans le sens transversal et appuyées sur un massif en maçonnerie ; les parties métalliques ont une hauteur variant de 40 m à 55 m

environ, amenant l'ouvrage à environ 70 m au-dessus de la vallée de la Bouble (figure 6). Les tabliers de ces deux ouvrages présentent une largeur de 4,50 m entre garde-corps. Ils sont constitués de poutres latérales à treillis multiples d'ordre 4 et ont une hauteur hors cornières de 4,54 m et un entre axes de 3,50 m.

6- Viaduc de la Bouble en construction.

7- Visite du tablier par cordistes.

8- Nacelle négative PF5.

9- Diagnostic anticorrosion.

10- Reprise des zones de prélèvements par tripleure.

6- Bouble viaduc under construction.

7- Deck inspection by rope-harnessed personnel.

8- Under-bridge work platform PF5.

9- Corrosion resistance diagnosis.

10- Retouching of sampling areas with stiffening material.



7



8

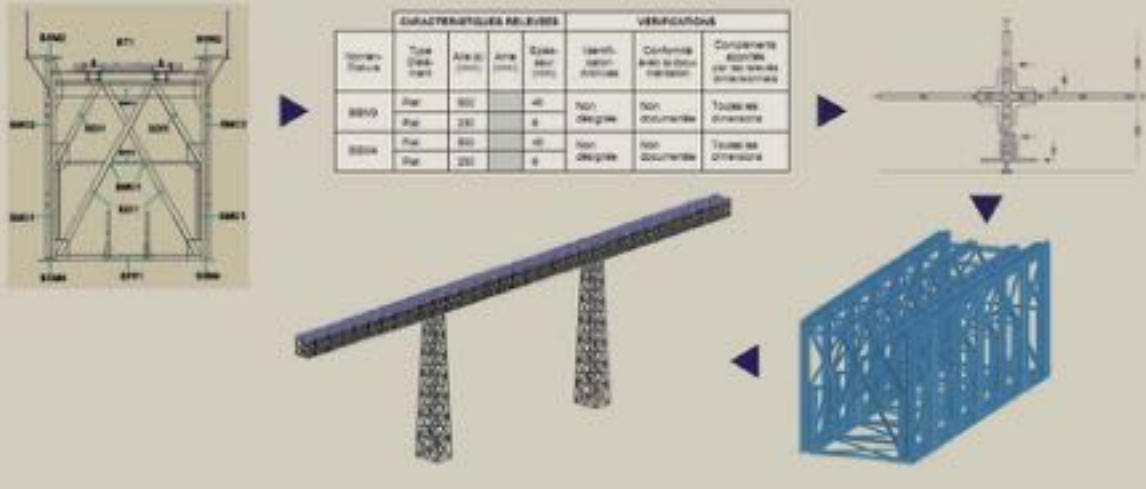


9



10

ÉLABORATION DES MODÈLES DE CALCULS SOUS PYTHAGORE®



© PHOTO THÉQUE DIADES 11

Les pièces de pont sont espacées de 2 m et supportent des longerons en acier qui ont été remplacés en 1965. Enfin, l'intérieur du tablier est équipé d'une passerelle fixe permettant son inspection, également remplacée en 1965.

LE DIAGNOSTIC

Dans le cadre de cette étude, la phase préalable de diagnostic avait pour objectif de conclure sur l'état général de ces ouvrages en s'assurant de leur aptitude à satisfaire le service attendu, en termes de charge et de fréquence. Le cas échéant, les mesures de ren-

11- Élaboration des modèles de calculs sous Pythagore®.

12- Masque au vent apporté par le confinement de l'ouvrage.

11- Development of design calculation models under Pythagore®.

12- Wind mask provided by the structure's confinement.

forcement définitives nécessaires pour assurer ce service et les mesures de renforcement provisoires nécessaires pour mettre en œuvre les méthodologies pour les travaux de régénération ont été définies.

Afin de compléter la connaissance des ouvrages basée en premier chef sur les données constituant les dossiers d'ouvrage, des investigations particulières ont été menées et notamment :

- Des visites sommaires réalisées en travail acrobatique (figure 7) et complétées de nuit à partir d'une nacelle négative sur wagon (figure 8) visant à mettre à jour la

connaissance des pathologies présentes sur les ouvrages (déconsolidation, foisonnement, fissuration éventuelle, ...)

- La prise de relevés dimensionnels complémentaires nécessaires aux modélisations et études structurales (figure 1) ;
- La réalisation de contrôles magnétoscopiques de quelques assemblages visant à rechercher, dans des zones sensibles, des dommages non perceptibles à l'œil ;
- La réalisation d'un diagnostic anticorrosion mettant notamment en évidence la présence de minium de plomb dans le système anticorrosion en place (figure 9) ;
- La recherche par spectroradiométrie des teintes des peintures d'origine à la demande des Architectes des Bâtiments de France (ABF) ;
- Le prélèvement d'échantillons et leurs analyses chimiques et mécaniques pour fiabiliser la connaissance des matériaux en place (figure 10) ;
- La réalisation de modèles de calculs complets des ouvrages sous le logiciel Pythagore®, développé par Setec TPI ;
- Et enfin la réalisation de chargements d'essais de nuit couplés à une instrumentation pour caler les modèles numériques.

LES ÉTUDES STRUCTURELLES

La présence de plomb dans les anciennes peintures a conduit à la nécessité de mise en œuvre de confinements étanches visant à éviter toute pollution de l'environnement. ▷



© PHOTO THÉQUE DIADES 12



13

© PHOTO THÉQUE DIADÈS

Ces confinements présentaient une prise au vent très importante sur des structures en treillis très ajourées, nécessitant des vérifications structurales des méthodes de travaux dès la phase des études de conception. Au stade du projet, les hypothèses consistaient à utiliser un échafaudage roulant de 20 à 21 m de long en fonction des ouvrages, en parallèle du confinement total d'une pile et sur la base de la technique de l'abrasif recyclé.

Des modèles globaux de chaque ouvrage ont été réalisés par Setec TPI et Diadès sur le logiciel Pythagore®, de manière à vérifier structurellement les ouvrages sous ces cas de charges inhabituels.

Ces modèles ont été bâtis à partir des résultats des investigations complémentaires et plus particulièrement des relevés dimensionnels pour la reconstitution de la géométrie de détail, et des résultats des prélèvements d'échantillons pour les caractéristiques des fers puddlés.

De manière à fiabiliser les résultats des calculs prédictifs du comportement de ces ouvrages, les modèles ont été calés sur la base de l'instrumentation et des chargements d'essais réalisés en phase de diagnostic (figure 11).

CALCULS EN FATIGUE

Compte-tenu de l'âge de ces 4 viaducs métalliques, des calculs de vérification vis-à-vis des phénomènes de fatigue ont été réalisés afin d'appréhender les zones sensibles et, le cas échéant, un cumul d'endommagement théorique des assemblages.

Sur la base d'estimations faites sur le trafic depuis 1869 et des comptages

disponibles sur la période de 2000 à 2007, un histogramme de chargement a été élaboré. Il distinguait les trains de fret et les trains voyageurs. Pour chaque assemblage sensible, un calcul de cumul d'endommagement a été réalisé après avoir déterminé les histogrammes de contraintes par la méthode de la goutte d'eau à l'aide du logiciel Pythagore®.

Les résultats mettaient en avant un endommagement cumulé théorique parfois bien supérieur à 1 et tendant à mettre en évidence un endommagement potentiel dans certaines sections. Afin de lever le doute quant à la présence de fissures de fatigue, des investigations complémentaires ont été réalisées par magnétoscopie (pour les assemblages simples) et par radiogra-



14

© PHOTO THÉQUE DIADÈS

13- Mise en œuvre des échafaudages roulants à l'aide d'une grue de 200 t.

14- Renforcement de contreventement par cornières liaisonnées par pinces Ischebeck.

13- Setting up rolling scaffolding with a 200-tonne crane.

14- Wind bracing strengthened by brackets attached by Ischebeck clamps.



© PHOTO THÉÂTRE DIADÈS
15

LA PRÉPARATION DES TRAVAUX DE RÉGÉNÉRATION DU VIADUC DU ROUZAT

En définitive, seul le viaduc du Rouzat a fait l'objet de travaux de régénération et de remise en peinture au second semestre 2013.

L'entreprise Lassarat était en charge de ce chantier sur une proposition de variante consistant à utiliser deux échafaudages roulants de 18 m de long sur le tablier concomitamment au confinement total des deux piles (figure 12).

La technique de l'abrasif perdu a été employée. L'étude de cette variante a mis en évidence la nécessité de réaliser des renforts provisoires au niveau des contreventements inférieurs du tablier (excès de compression et risque de flambement) par pinces (figure 14) et des zones de dédoublement des fûts des piles au droit des arbalétriers (traction excessive dans la fonte).

Les piles en fonte ont été précontraintes partiellement à 80 t avec un ancrage du dispositif dans la maçonnerie de 20 t par fût.

Enfin, une procédure de gestion spécifique des phénomènes de vent a été rédigée pour programmer le dé-confinement partiel d'urgence des échafaudages roulants au-delà d'une vitesse de vent limite.

De manière à s'assurer de la faisabilité technique de cette variante dans un délai contraint de fermeture de voie, une étude spécifique a été réalisée durant la période de préparation, en étroite collaboration entre le maître d'œuvre Diadès, l'entreprise Lassarat et ses bureaux d'études IOA et Semi. Elle visait à s'assurer que les renforts pouvaient être mis en œuvre sans percement de la structure existante.

Compte-tenu de l'exiguïté du site et des hauteurs importantes, ces opérations ont nécessité la mise en œuvre de moyens de manutention conséquents. À ce titre, une grue de 120 t a été déployée pour l'amenée des colliers de renfort des piles nécessitant la fermeture de la RD 37 franchie par l'ouvrage.

Les échafaudages des piles ont été montés en temps masqué à partir du 15 avril 2013, hors arrêt de la circulation des trains sur l'ouvrage, l'accès au tablier étant, pendant toute cette partie des travaux, strictement interdit. Dès la mise à disposition de l'intégralité de l'ouvrage à l'entreprise le 24 juin 2013, une grue de 200 t a permis la mise en œuvre des échafaudages roulants sur le tablier (figure 13).



© PHOTO THÉÂTRE DIADÈS
16

15- Installation de chantier vue depuis la pile dans la Sioule.

16- Installation des systèmes de sablage et de récupération des déchets.

15- Construction plant view from the pier in the Sioule.

16- Installation of sandblasting and waste recovery systems.

phie (pour les assemblages présentant plus de 2 plats) sur les zones sensibles identifiées préalablement par le calcul. Les contrôles par radiographie ont été menés à l'aide d'une source d'iridium 192 et de doubles films D4 et D5. Ces investigations n'ont pas fait apparaître de pathologies structurelles importantes et ont conforté le Maître d'Ouvrage dans sa décision d'investir dans la remise en peinture des ouvrages.

RÉALISATION DES TRAVAUX

La Sioule étant régulée par un barrage en amont, la base vie a pu être installée le long de la rivière sans craindre les inondations. Ainsi deux bureaux, une salle réfectoire et des douches et vestiaires suffisants pour une vingtaine de compagnons ont été installés en contrebas de la route. À proximité, la production d'énergie, d'air comprimé asséché, le dispositif amphitec servant à l'aspiration des résidus de sablage ainsi que l'atelier peinture ont également trouvé leur place (figure 15).

Toute la place autour de la pile le long de la route a également été exploitée. On y trouve l'ascenseur, élément indispensable pour acheminer les équipes et le matériel à 52 m au-dessus de la route en optimisant les temps de travail, un sas à trois compartiments pour la gestion du risque plomb, puis tout l'atelier de sablage et de filtration. Les sableuses ont été rassemblées dans un conteneur, au-dessus duquel a été disposé un conteneur réservoir d'abrasif (figure 16). Cette installation, développée par Lassarrat, a permis une alimentation gravitaire des sableuses, avec un minimum de manutention et une très bonne optimisation des temps de coupure. La proximité avec la route a simplifié également l'approvisionnement d'abrasif, qui était alors assuré par camion silo. L'espace a été utilisé pour la récupération des résidus de sablage au moyen d'un caisson étanche permettant l'ensachage automatisé en big bag étanche de 1,2 m³. Ce système est également utilisé dans le cas de chantier comportant un risque amiante. Enfin, la centrale de renouvellement d'air avec filtrage total d'une capacité de 60 000 m³/h permettait d'obtenir un recyclage de l'air dans le confinement : entre 6 et 8 volumes par heure, suivant les sections.

Pour assurer la sécurité des compagnons vis-à-vis des risques routiers, une passerelle permettait le passage des hommes et des réseaux au-dessus de la RD 37.

En raison de la présence de plomb, les opérations de sablage ont dû être réalisées en milieu confiné. Ce confinement était réalisé avec des bâches thermosoudables d'une épaisseur de 230 µm au niveau des parois, hormis pour le sol des échafaudages roulants du tablier qui était de 600 µm. Des entrées d'air étaient disposées judicieusement pour assurer son renouvellement dans l'enceinte, placée en dépression au moyen de la centrale d'aspiration dédiée. Les zones exigües où les opérateurs



17
 © PHOTOTHÈQUE DIADES

risquaient de perforer le confinement ont été protégées par des plaques de contreplaqué ou un doublage de la bâche.

Par ailleurs, des examens médicaux avec prise de sang préalables au chantier puis mensuellement ont été réalisés sur l'ensemble des opérateurs afin de suivre le risque de plombémie.

Une démarche préalable de concertation en phase de conception avait d'ailleurs été initiée auprès de la CARSAT, de la CRAM et de l'OPPBTP.

Pour la gestion du risque « vent », des anémomètres ont été placés en différents endroits de la structure.

La procédure de dé-confinement d'urgence, couplée à une consultation des prévisions météorologiques, a fait l'objet d'un suivi strict pour le cas de vents violents.

Les prévisions permettaient d'anticiper cette situation et ainsi d'organiser

17- Mise en œuvre du primaire à l'airless après réalisation de prétouches.

17- Airless spraying of primer after preliminary retouching.

le chantier afin de ne pas générer de risque environnemental en cas d'ouverture du confinement.

Lors des épreuves de convenance, une difficulté particulière pour le décapage des piles en fonte a été détectée.

La fonte se trouvait irrégulièrement couverte de calamine adhérente. Afin d'obtenir une protection anticorrosion régulière sur l'ensemble de la surface,

il a été décidé de supprimer toutes traces de calamine et d'obtenir un décapage de qualité Sa2 ½.

Par ailleurs, cet ouvrage ancien est constitué essentiellement de cornières, assemblées par rivetage, ce qui génère de nombreuses aspérités et entrefers. Le décapage de ces surfaces est donc très chronophage. Une bonne expérience du sablage est requise pour obtenir une rugosité de type moyen G sans écrouir le fer à force de le marteler avec l'abrasif.

La consommation d'abrasif, lors du pic de production obtenu par deux équipes de six sableurs travaillant en deux postes, a atteint 27 t par semaine. Les sableurs étaient équipés d'un casque intégral avec une jupe descendant sur les épaules, et d'une visière en verre afin de les protéger des projections d'abrasif dues aux rebonds contre le subjectile. La plaque de verre était régulièrement changée car polie par l'abrasif. Chaque opérateur était alimenté en air frais par l'intermédiaire d'un masque intégral au moyen d'un compresseur équipé de filtres adéquats, placé sous le casque.

Le renouvellement d'air, à raison de 6 volumes par heure minimum, permettait de conserver une visibilité correcte dans l'enceinte du sablage.

Le nettoyage a été assuré en plusieurs étapes. Tout d'abord un maximum de résidus était aspiré. L'ensemble des surfaces était ensuite balayé et soufflé et une nouvelle aspiration pouvait être réalisée. Enfin, un dernier soufflage, à l'air sec pour ne pas provoquer de corrosion de l'acier mis à nu, était nécessaire avant la mise en peinture. La mise en peinture a été réalisée depuis le haut, de manière à ne pas risquer de déposer des particules, souvent présentes dans les éléments d'échafaudage, sur les surfaces fraîchement traitées.

L'application de la peinture a suivi un protocole spécifique. Les conditions climatiques étaient déterminantes. Suivant les tolérances de la peinture appliquée, l'hygrométrie devait être inférieure à 85 % d'humidité relative, la température ambiante comprise entre 3 et 35°C et la température du subjectile au minimum supérieure de 3°C par rapport au point de rosée. Ces conditions pouvaient être respectées naturellement ou au moyen d'assécheurs d'air et de systèmes de chauffage de l'enceinte confinée.

Des prétouches ont été réalisées à la brosse au niveau des angles et des rivets préalablement à l'application à

PRINCIPALES QUANTITÉS

SURFACE DE CONFINEMENT : 6300 m²

POIDS DES ÉCHAFAUDAGES :

13 t par roulant pour un total de près de 130 t

SURFACE DÉCAPÉE : 10 200 m²

POIDS DES DÉCHETS : 1 200 t

VOLUME DE PEINTURE :

près de 1 500 l pour la réalisation des 3 couches

NOMBRE D'HEURES TRAVAILLÉES PAR L'ENTREPRISE :

près de 9 000 h

TRAVAIL EN DEUX POSTES : avec 24 opérateurs, 2 personnes d'encadrement et jusqu'à 8 sableurs en simultané



18

© PHOTOTHÈQUE DIADÈS

l'air-less des trois couches de peinture du système C4AMV afin de garantir les épaisseurs minimales exigées en tout point de la structure (figure 17). Les travaux ont été réalisés sur une période totale de 8 mois avec une coupure de la ligne de 6 mois et une mise à disposition du tablier pour l'entreprise de 4,5 mois. La ligne a été restituée dans les délais et les circulations commerciales ont repris le 16 décembre 2013, sur un ouvrage remis « à neuf » (figure 18). □

18- Dépose des derniers échafaudages et repose de la voie avant ouverture à la circulation.

18- Dismantling the last scaffolding and laying the track again before opening to traffic.

INTERVENANTS DU PROJET

MAÎTRE D'OUVRAGE : RFF (Réseau Ferré de France)

REPRÉSENTANT DU MAÎTRE D'OUVRAGE : SCET (Société Centrale pour l'Équipement du Territoire), Algae, Egis, SeAu (Société d'équipement de l'Auvergne)

MAÎTRE D'ŒUVRE : Setec Ferroviaire, Diadès, avec assistance ponctuelle d'IPRS, Setec TPI

ENTREPRISES : Lassarat assistée d'Entrepose (échafaudage), ADS (charpente métallique), IOA (études d'exécution), SEMI (méthodes)

ABSTRACT

DIAGNOSIS AND RENOVATION OF 4 EXCEPTIONAL EIFFEL TYPE VIADUCTS

CÉDRIC LAMARSAUDE, DIADÈS - RENAUD LECONTE, DIADÈS - CHRISTOPHE RAULET, DIADÈS - CLAIRE DEFARGUES, SETEC

As part of its project management work for the Plan Rail Auvergne produced by Setec on behalf of RFF, Diadès was responsible for the diagnosis of four 19th century steel viaducts located on the Lavaufanche/Saint-Germain-des-Fossés line. The task involved gathering and analysing archives of the viaducts, carrying out a comprehensive programme of investigations and diagnosis (dimensional readings, detailed inspections, corrosion resistance diagnosis, spectrophotometry, test specimen sampling and analysis, structural redesign with fatigue calculation), and then defining the work schedule for renovation and repainting of two viaducts, taking into account the problem of lead present in the old paints. The works described were performed on the Rouzat viaduct by the contractor Lassarat, with Diadès acting as Project Manager. □

DIAGNÓSTICO Y REHABILITACIÓN DE 4 VIADUCTOS EXCEPCIONALES DE TIPO EIFFEL

CÉDRIC LAMARSAUDE, DIADÈS - RENAUD LECONTE, DIADÈS - CHRISTOPHE RAULET, DIADÈS - CLAIRE DEFARGUES, SETEC

En el marco de la dirección de obra del Plan Rail Auvergne realizada por Setec por cuenta de RFF, la empresa Diadès se encargó del diagnóstico de 4 viaductos metálicos del siglo XIX situados en la línea Lavaufanche - Saint-Germain-des-Fossés. La misión consistió, después de recabar y analizar los archivos de los viaductos, en realizar un programa de investigaciones y diagnóstico completo (lecturas dimensionales, inspecciones detalladas, diagnóstico anticorrosión, espectrocolorimetría, toma y análisis de muestras, recálculo de las estructuras con cálculo en fatiga) y, después, en definir el programa de las obras de regeneración y repintado de 2 viaductos, integrando la problemática del plomo existente en las antiguas pinturas. La empresa Lassarat realizó las obras presentadas en el viaducto de Rouzat bajo la dirección de obra de Diadès. □



1

© PHOTOTHÉQUE SETEC TPI

INSPECTION ET DIAGNOSTIC DU BATEAU-PORTE DE LA FORME 10 À MARSEILLE

AUTEURS : TANCRÈDE DE FOLLEVILLE, INGÉNIEUR EN CHEF, SETEC TPI - CHRISTOPHE RAULET, DIRECTEUR GÉNÉRAL, DIADÈS - BERNARD QUENÉE, DIRECTEUR GÉNÉRAL DÉLÉGUÉ, LERM

LA FORME DE RADOUB N°10 DU PORT DE MARSEILLE EST UN OUVRAGE DE GRANDES DIMENSIONS DESTINÉ À LA RÉPARATION NAVALE. N'ÉTANT QUASIMENT PLUS UTILISÉE DEPUIS UNE DIZAINE D'ANNÉES, SA REMISE EN EXPLOITATION PROCHAINE NÉCESSITE LA CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU BATEAU-PORTE. LE CHANTIER DOIT SE DÉROULER À L'INTÉRIEUR MÊME DE LA FORME 10 ET IL FAUT DONC S'ASSURER QUE L'ANCIEN BATEAU-PORTE EST APTE À ISOLER UNE DERNIÈRE FOIS LA FORME DE LA MER, LE TEMPS DE LA DURÉE DES TRAVAUX. LE PORT DE MARSEILLE DEMANDE DONC UNE EXPERTISE DE L'OUVRAGE.

CONTEXTE DE L'OPÉRATION

La forme de radoub n°10 du Grand Port Maritime de Marseille (GPMM) est un ouvrage aux dimensions hors norme : 465 m de longueur, 85 m de largeur et 14 m de hauteur. Avec un volume de 480 000 m³, c'est la troi-

sième plus grande forme de réparation navale au monde, après celles de Dubaï et de Lisbonne. Elle fut construite entre 1972 et 1976 pour recevoir la nouvelle génération des navires « Supertanker », ULCC (Ultra Large Crude Carriers), des pétroliers de 700 000 t à 800 000 t

1- La forme 10 du GPMM vue d'avion.

1- Aerial view of GPMM dry dock 10.

(figure 2). Cette forme est isolée de la mer par un bateau-porte, ouvrage monolithique en béton précontraint, de forme parallélépipédique de 87,35 m de longueur, 15 m de largeur et 13,5 m de hauteur. En plan, le bateau-porte est constitué de trois cloisons longitudinales



2- Le supertanker Batillus en cale sèche dans la forme 10.

3a- Bateau-porte - vue en plan.

3b- Bateau-porte - vue en coupe.

2- The super-tanker Batillus in dry dock 10.

3a- Floating caisson - plan view.

3b- Floating caisson - cross-section view.

et de quinze cloisons transversales qui délimitent les vingt-huit alvéoles identiques de dimensions intérieures 5,82 m x 6,64 m groupées en quatre compartiments de ballast. Les épaisseurs de béton sont de 0,50 m pour la dalle de fond, 0,44 m pour les parois longitudinales, 0,45 m pour les parois transversales d'extrémité et inter-ballast, 0,34 m pour les parois transversales, et 0,30 m pour le pont supérieur. La précontrainte de la structure est totale ; elle est assurée par des câbles 12T13 de classe TBR (procédé STUP), verticalement par des boucles et horizontalement par des câbles droits. La dalle de fond, les cloisons et le pont supérieur sont précontraints dans deux directions à des taux variant entre 2,7 MPa et 4,0 MPa pour un béton ayant une résistance d'origine d'environ 30 MPa. Les câbles, d'une densité moyenne de 51 kg/m³, sont protégés par des gaines rigides raccordées par des manchons spéciaux étanches (figures 3a & 3b).

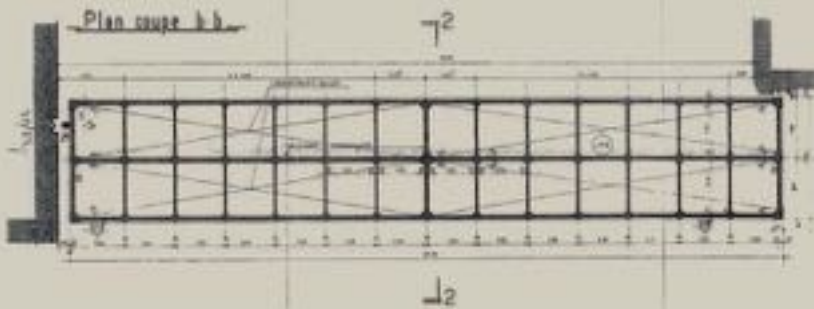
Le pont supérieur du bateau-porte est équipé d'une passerelle de circulation à la cote +3,50 m permettant le passage des véhicules utilitaires.

L'étanchéité verticale est réalisée par deux ventelles métalliques munies de bavettes en caoutchouc plaquées par la pression de l'eau. L'étanchéité basse est assurée par un joint en caoutchouc précomprimé, encadré et protégé par les bois d'appui en azobé. La ligne d'appui horizontale étanche se retourne sous les parois d'extrémité de la porte pour permettre la continuité avec les ventelles.

En position de fermeture, le bateau-porte est autostable et se comporte comme un barrage poids. Il est échoué sur deux lignes d'appuis.

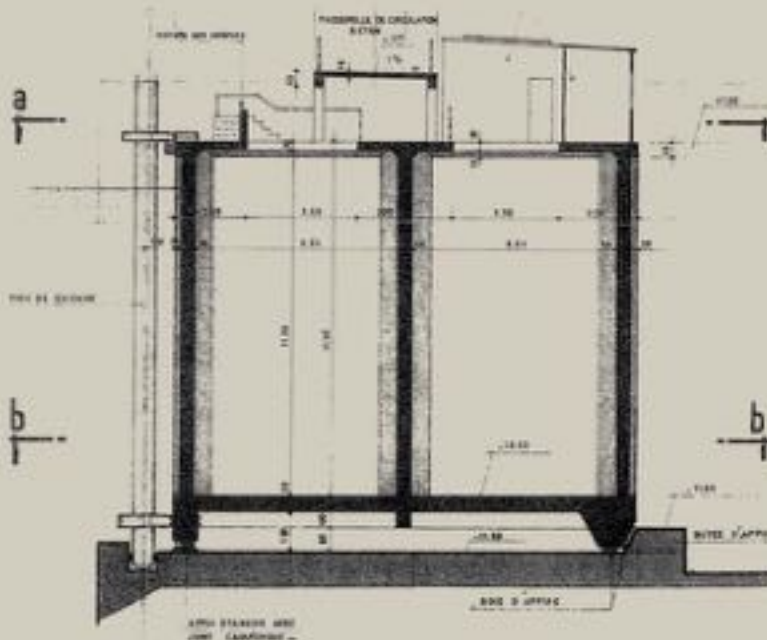


BATEAU-PORTE - VUE EN PLAN



3a

BATEAU-PORTE - VUE EN COUPE



3b



4



6



5



7

© PHOTO THÉRIQUE SETEC TPI

© PHOTO THÉRIQUE SETEC TPI

L'appui côté mer transmet au seuil des réactions verticales comprimant le dispositif d'étanchéité, tandis que l'appui côté forme transmet au seuil outre les réactions verticales, les composantes horizontales de poussée de l'eau.

En position de garage, le bateau-porte flotte (tirant d'eau de 8 m) et il est amarré au voisinage immédiat de la forme 10 (figure 4).

Cette forme connaît une activité florissante jusqu'au milieu des années 80 qui marque la disparition progressive des supertankers.

Par la suite, l'exploitation de l'ouvrage rencontre des hauts et des bas jusqu'au début des années 2000. L'exploitation s'arrête définitivement en 2002, et même si le port se sert encore occasionnellement de la forme comme d'une simple ligne d'amarrage supplémentaire pour des navires de passage, le bateau-porte, lui, n'est plus guère utilisé.

En 2011 le port de Marseille décide de réhabiliter la forme 10 pour travailler notamment sur le nouveau marché de la réparation navale des navires

4- Bateau-porte au mouillage dans le port de Marseille.

5- Travaux de réparation réalisés en l'an 2000.

6- Inspection des parements extérieurs par nacelle télescopique.

7- Inspection des caissons par cordistes.

4- Floating caisson at anchor in the port of Marseille.

5- Repair work performed in the year 2000.

6- Inspection of external cladding by telescopic work platform.

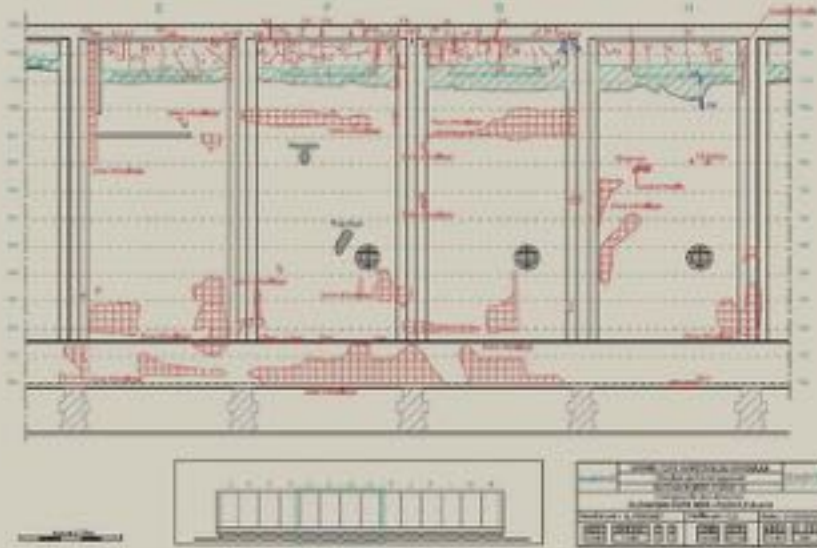
7- Inspection of caissons by rope-harnessed personnel.

de croisières, dont le nombre et la taille connaissent un essor important. En effet, 65% de la flotte mondiale de grands bateaux de croisière passent en Méditerranée où aucune offre de réparation appropriée n'est actuellement disponible. Une convention d'exploitation de la forme 10 est signée en juin 2012 avec un groupement d'entreprises internationales pour une durée de 25 ans.

C'est dans ce contexte, que le port de Marseille décide de construire un nouveau bateau-porte, car l'ancien, déjà âgé de près de 40 ans, n'est plus conforme aux nouveaux règlements. De surcroît, il n'a pas été utilisé depuis 10 ans et son état relativement vétuste ne permet pas d'envisager raisonnablement une remise en service pour les 25 années à venir.

Il faut donc construire un nouveau bateau-porte, mais compte-tenu des dimensions du futur ouvrage, qui sera assez similaire à son prédécesseur, le

EXEMPLE DE CARTOGRAPHIE DES DÉSORDRES



8- Exemple de cartographie des désordres.

9- Couleur de rouille sur les parements du bateau-porte.

10- Fenêtre pathologique pour examen visuel de la précontrainte.

11- Profils de concentration en chlorures totaux dans les échantillons prélevés côté Forme.

8- Example of damage mapping.

9- Rust streak on the cladding of the floating caisson.

10- Damage viewer for visual inspection of prestressing.

11- Total chloride concentration profiles in the samples taken on the dry dock side.

© PHOTOTHÈQUE SETEC TPI

8



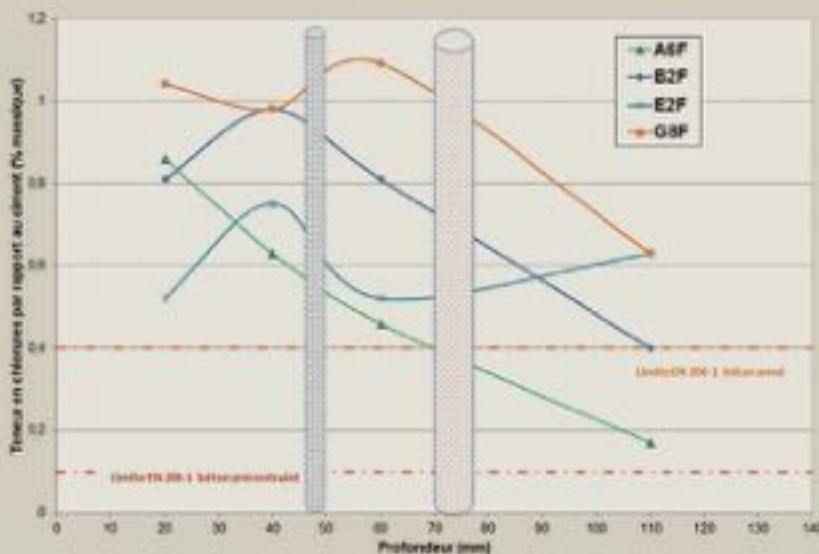
© PHOTOTHÈQUE SETEC TPI

9



10

PROFILS DE CONCENTRATION EN CHLORURES TOTAUX DANS LES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS CÔTÉ FORME



© PHOTOTHÈQUE SETEC TPI

11

choix de réaliser le chantier à l'intérieur même de la forme 10 s'impose rapidement comme une évidence.

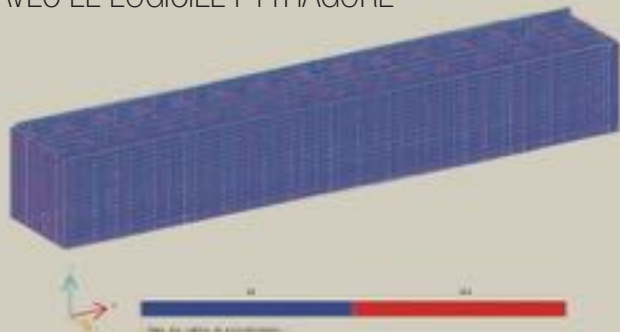
Le port doit alors s'assurer que l'ancien bateau-porte est encore capable de remplir sa fonction une dernière fois, le temps de fermer la forme 10 pour abriter la construction de son remplaçant. Il faut faire vite, car la livraison du nouveau bateau-porte est prévue au cours du second semestre 2015.

INSPECTION DÉTAILLÉE EXCEPTIONNELLE

Même s'il a fait l'objet de travaux de réparation en l'an 2000 (figure 5) et d'un contrôle de sa structure par Setec TPI en 2002, le bateau-porte laisse entrevoir sur sa partie émergée un certain nombre de désordres.

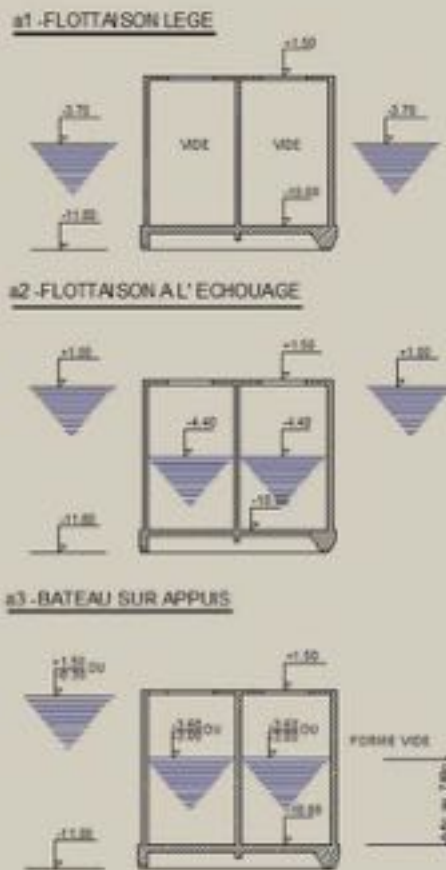
Le GPMM décide donc en juillet 2012, de confier au groupement Diadès/Lerm/Setec TPI (trois sociétés du groupe Setec) une mission d'expertise complète de l'ouvrage dont l'objectif final est de définir et d'estimer financièrement les travaux indispensables et les instrumentations à mettre en place pour fiabiliser l'utilisation du bateau-porte pendant la durée du chantier. ▷

MODÈLE ÉLÉMENTS FINIS DU BATEAU-PORTE AVEC LE LOGICIEL PYTHAGORE®



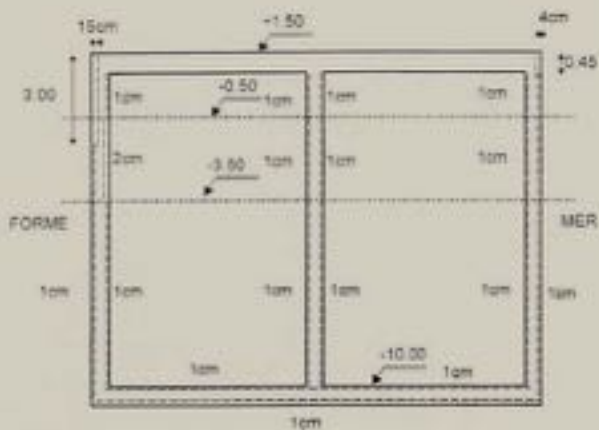
12

CAS DE CHARGE D'UTILISATION NORMALE DU BATEAU-PORTE



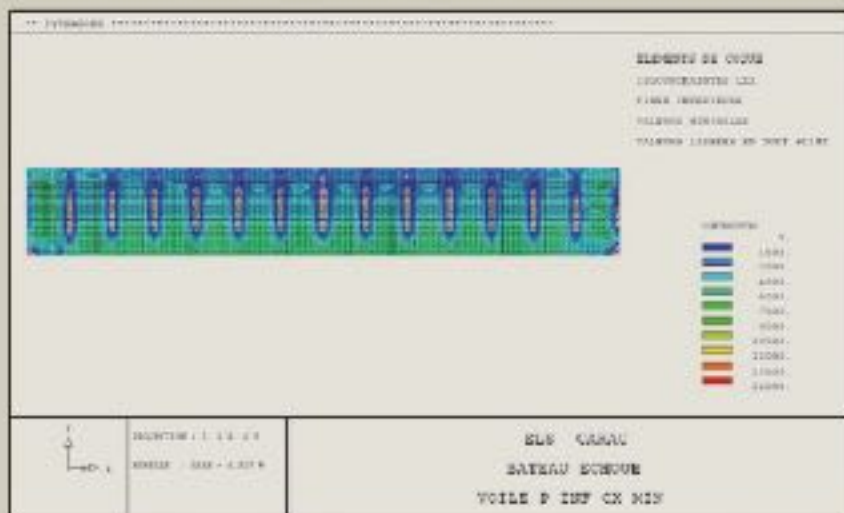
14

CARTE DES RÉDUCTIONS DES ÉPAISSEURS PRISE EN COMPTE DANS LES CALCULS



13

DIAGRAMME DE CONTRAINTE SOUS ELS CARACTÉRISTIQUE



15

12- Modèle éléments finis du bateau-porte avec le logiciel Pythagore®.

13- Carte des réductions des épaisseurs prise en compte dans les calculs.

14- Cas de charge d'utilisation normale du bateau-porte.

15- Diagramme de contrainte sous ELS caractéristique.

12- Finite element model of the floating caisson with the Pythagore® software.

13- Map of thickness reductions allowed for in the calculations.

14- Load case for normal use of the floating caisson.

15- Diagram of strain in characteristic SLS.



16

© PHOTOTHÈQUE SETEC TPI

La première étape consiste en une inspection détaillée permettant d'actualiser la cartographie et l'intensité des pathologies qui affectent ses différents constituants (béton, armatures passives, armatures de précontrainte, dispositifs d'accostage...).

Le bateau-porte est alors convoyé jusqu'à la forme 9 où il est mis en cale sèche durant 4 semaines au mois d'août 2012.

Le port procède d'abord à un important nettoyage de l'ouvrage permettant de dégager les parements extérieurs des divers dépôts marins qui les recouvrent. L'intervention de la société Diadès peut alors commencer. Elle se déroule sur une durée record d'une semaine, du 13 au 20 août 2012.

Le programme des investigations a été soigneusement préparé en amont, sur la base des rapports des visites de contrôles antérieures, l'ouvrage ayant toujours fait l'objet d'un suivi assez régulier depuis sa mise en service. L'inspection des parements extérieurs

16- Chantier du nouveau bateau-porte dans la forme 10.

16- Work on the new floating caisson in dry dock 10.

est réalisée à l'aide de nacelles télescopiques positives (figure 6), tandis que l'intérieur des caissons est visité par des cordistes (figure 7).

Tous les désordres observés sont méthodiquement répertoriés puis cartographiés sur une quarantaine de plans développés de toutes les faces de la structure (figure 8).

Les principales pathologies recensées sont des coulures de rouille témoignant de la corrosion des armatures passives, plus particulièrement marquée dans les

zones de marnage où le foisonnement des aciers provoque localement des éclats de béton (figure 9).

Les dispositifs d'accostage sont également fortement corrodés.

Les spécialistes du Lerm (Laboratoire d'Études et de Recherche sur les Matériaux) interviennent ensuite pour effectuer des prélèvements de plusieurs échantillons (carottages de béton, coulis de précontrainte, etc.) destinés aux analyses chimiques en laboratoire. Ils procèdent également à l'ouverture de fenêtres pathologiques pour examiner visuellement l'état des câbles (figure 10).

Sur les 4 fenêtres réalisées, aucune anomalie de remplissage des gaines n'est constatée et seul un léger enrouillement de certains conduits intérieurs ainsi que quelques piqûres de corrosion sur les fils sont observés. L'expertise de la précontrainte est complétée par des clichés de gammagraphie et des tirs d'arbalète (voir encadré).

ANALYSE DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

Les analyses chimiques réalisées par le Lerm permettent d'établir un diagnostic sur l'état des matériaux du bateau-porte :

Le béton dont la résistance caractéristique d'origine était de 30 MPa a continué à durcir au fil du temps. Les résultats des essais d'écrasement menés sur 8 sondages carottés donnent ainsi des valeurs de résistance caractéristique allant de 52,5 MPa coté forme à 58,8 MPa côté mer.

Compte-tenu de l'environnement marin particulièrement agressif dans lequel le bateau-porte est utilisé, la détermination du taux de chlorures dans le béton constitue également un critère important pour évaluer la corrosion des armatures et donc l'état de conservation général de l'ouvrage. Les chlorures totaux sont déterminés par potentiométrie après attaque acide ménagée : ils sont dosés dans les bétons provenant du côté forme et ►

du côté mer, à plusieurs profondeurs (10/25 mm ; 30/45 mm ; 50/65 mm et 100/115 mm), afin de mettre en évidence leur pénétration.

Les résultats obtenus sont d'une part exprimés en fonction de la masse de béton, et d'autre part rapportés à la masse de ciment, afin de comparer les valeurs obtenues avec les seuils réglementaires (figure 11). Ils montrent des teneurs en chlorures très élevées et supérieures aux spécifications en vigueur, et ce jusqu'à 115 mm de profondeur, c'est-à-dire au-delà de l'enrobage minimal des aciers passifs (45 mm) et de celui des gaines de précontrainte (70 mm). Les concentrations sont plus élevées côté forme que côté mer à cause de la succession des cycles d'humidité et de séchage.

Le pH du coulis des gaines de précontrainte est également déterminé afin d'estimer le rapport Cl-/OH-. Selon Hausmann, le seuil critique de dépassement à partir duquel s'amorce la corrosion correspond à un rapport Cl-/OH- de 0,6.

Les mesures réalisées conformément aux paragraphes § 6.3.2, § 6.5 et § 7.3 de la norme XP P 18-458 de novembre 2008 montrent que le coulis prélevé est caractérisé par un rapport Cl-/OH- nettement inférieur à la valeur de 0,6 considérée comme seuil d'initiation de la corrosion.

VÉRIFICATION DE LA STRUCTURE

La troisième phase de l'opération consiste en un recalcul complet de l'ouvrage réalisé par les ingénieurs de Setec TPI.

Le bateau porte, calculé à l'époque de sa construction (1973-1974) suivant les règles du CCBA 68 et de l'instruction provisoire IP1, est vérifié en considérant la réglementation vigueur (Eurocode 2 et BPEL 99) et en tenant compte de son état actuel :

Pour le béton, la résistance caractéristique à la compression prise en compte est de 40 MPa, valeur conservatrice par rapport aux résultats des essais du Lerm (55 Mpa) mais supérieure au dimensionnement d'origine : $\sigma_{28} = 30$ MPa.

Pour la précontrainte, les résultats satisfaisants de l'inspection permettent de modéliser les câbles sans diminution de section avec la précontrainte théorique après pertes différées : $115 \text{ kN} < P < 120 \text{ kN/toron}$, valeur conservatrice par rapport aux résultats des essais d'arbalète $P = 130 \text{ kN/toron}$. Soit une précontrainte moyenne $P \approx 0,79 \times P_{\text{initiale}}$.

Le calcul de l'ouvrage est effectué à partir d'un modèle aux éléments finis réalisé à l'aide du logiciel Pythagore® développé par Setec TPI, permettant de modéliser l'ensemble du bateau-porte et sa précontrainte (figure 12).

Les calculs de vérification de la structure sont menés sur la base de la géométrie initiale, mais en intégrant, dans certaines sections, des réductions d'épaisseur de béton ou d'aciers passifs en fonction des désordres constatés sur l'ouvrage.

Le béton projeté mis en œuvre lors de la réparation de l'an 2000 n'est pas pris en compte dans les sections de calcul, de même que le béton de réparation (mortier prêt à l'emploi) mis en œuvre lors de la réparation de 1991. La section des armatures passives est également réduite pour tenir compte de la corrosion. La réduction est proportionnelle à la diminution d'épaisseur du béton (figure 13).

La modélisation prend en compte le phasage des éléments de construction (coulage des éléments en damier horizontalement en 4 phases, coulage du radier puis de 5 levées successives, début du coulage le 1^{er} janvier 1974 avec 1 mois pour chaque levée, 6 mois entre le coulage du premier élément

17- Principe de l'essai à l'arbalète.

17- Crossbow test principe.

EXPERTISE DE LA PRÉCONTRAINTÉ

Une partie de l'inspection détaillée a été spécialement consacrée à l'expertise de la précontrainte, réalisée par gammagraphie et tirs d'arbalète.

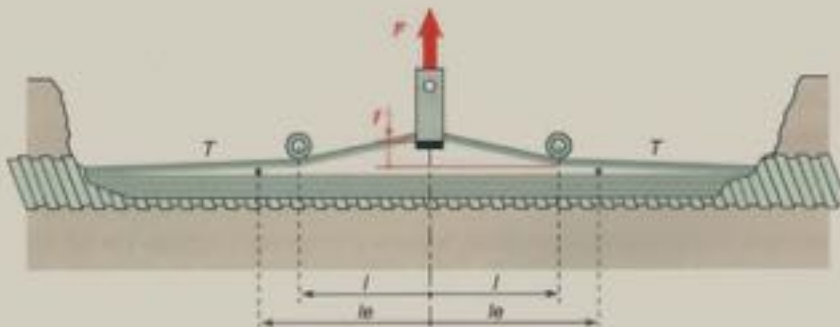
TIRS D'ARBALÈTE

Les tirs d'arbalète ont été effectués par le Lerm. Le but est de déterminer la tension résiduelle réelle dans les câbles de précontrainte à l'aide d'un essai non destructif à partir d'une fenêtre pathologique. Le principe de base du fonctionnement de l'arbalète est fondé sur le fait que plus une armature est tendue, plus l'effort F nécessaire à la dévier de son tracé d'une flèche f sera important. L'arbalète, munie d'un capteur de déplacement et d'un capteur de force, s'appuie sur l'armature testée par deux roulettes, et exerce l'effort de déviation par l'intermédiaire d'une fourchette qui saisit l'armature à mi-empatement. La flèche communiquée à l'armature au cours de l'essai est limitée à 3% de sa demi-longueur l , de manière à limiter également les contraintes supplémentaires de flexion générées par l'essai. Les mesures de la tension résiduelle des fils de précontrainte par l'essai à l'arbalète, sont encadrées par le guide technique du LCPC « Mesure de la tension des armatures de précontrainte à l'aide de l'arbalète » de novembre 2009 (figures 17 et 18).

GAMMAGRAPHIE

Les clichés de gammagraphie permettent de contrôler la bonne injection des gaines de précontrainte et d'identifier le cas échéant les zones potentielles de corrosion. 13 clichés de gammagraphie ont été réalisés par le CETE de Lyon, sous-traitant de Diadès sur cette opération. Les clichés sont pris à l'aide d'une source radioactive qu'on approche des parements et qui impressionne un film positionné de l'autre côté (figure 19). Le programme de la campagne de gammagraphie a été déterminé par la société Diadès, en fonction des résultats des précédentes d'auscultation réalisées entre 1979 et 2000. L'épaisseur des âmes des caissons, qui peut atteindre 50 cm, nécessite l'emploi d'un support sensible rapide (résolution de 100 μm) et d'une distance source-film de 90 cm pour limiter le temps d'exposition à 35 minutes et obtenir une bonne qualité d'image. La source utilisée est du cobalt 60 (figure 20). L'extraction des radiogrammes se fait par lecture laser et leur validation est effectuée dans un fourgon à proximité du site (figure 21). Les 13 radiogrammes obtenus ont permis d'examiner 5 câbles verticaux à différentes hauteurs, et 10 câbles longitudinaux (dont deux en deux points). Aucun défaut significatif de remplissage des conduits n'a été observé, en dehors de deux très petits vides en haut de conduit (2 à 3 mm). Ces manques de coulis, qui ne touchaient pas les torons de précontrainte, n'ont pas justifié une ouverture de fenêtre spécifique.

PRINCIPE DE L'ESSAI À L'ARBALÈTE



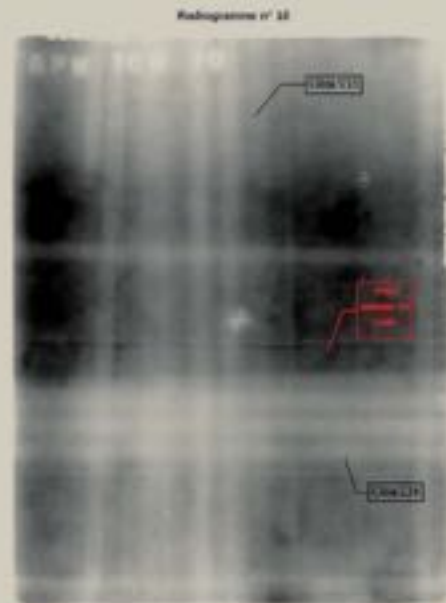


18



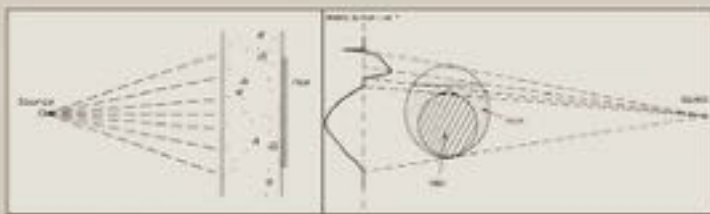
20

RADIOGRAMME



21

PRINCIPE DE LA GAMMAGRAPHIE



19

de radier et du dernier élément de la levée 5). L'intégralité de la précontrainte est appliquée 5 jours après le coulage du dernier élément de béton de la porte. Les effets différés jusqu'au 1^{er} janvier 2013 sont ensuite calculés au moyen du logiciel de calcul.

La structure est vérifiée pour l'ensemble des situations normales et exceptionnelles (figure 14).

Les calculs montrent que l'ouvrage ne respecte pas les critères de maîtrise de la fissuration des Eurocodes (EN 1992-1-1 § 4.2), qui exigent pour les bétons de classe XS3 (zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns) une non-décompression

18- Essai à l'arbalète sur le bateau-porte.

19- Principe de la gammagraphie.

20- Source de cobalt 60.

21- Radiogramme.

18- Crossbow tests.

19- Principle of gammagraphy.

20- Source of cobalt 60.

21- Radiograph.

du béton à l'ELS fréquent (figure 15). Cependant, l'ouvrage ne présente pas de risque de ruine, même dans les situations exceptionnelles de ballastage qui ont été étudiées.

L'ensemble des résultats de cette mission a donc permis de conclure

que l'ouvrage actuel était apte à assurer, à court terme, la fermeture de la forme 10 pendant le temps de construction du nouveau bateau-porte. À l'heure où nous écrivons ces lignes, la construction du nouveau bateau-porte a commencé (figure 16). □

INTERVENANTS DU PROJET

MAÎTRE D'OUVRAGE : Grand Port Maritime de Marseille

INTERVENANTS : Setec TPI, Diadès, Lerm

SOUS-TRAITANTS : CETE de Lyon

ABSTRACT

INSPECTION AND DIAGNOSIS OF THE FLOATING CAISSON OF DRY DOCK 10 IN MARSEILLE

T. DE FOLLEVILLE, SETEC TPI - C. RAULET, DIADÈS - B. QUENÉE, LERM

At the request of Grand Port Maritime de Marseille, the consortium formed by Diadès, Lerm and Setec TPI is performing a check-up on the floating caisson of dry dock No. 10 to ensure that it is capable of performing its function after ten years without being used. The assignment breaks down into three phases: a detailed inspection to identify any damage, laboratory tests on the component materials of the structure, and a verification of the structure by finite-element calculation. The detailed inspection is supplemented by specific diagnosis of the prestressing, performed by gammagraphy films and crossbow tensile/compression tests. □

INSPECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL BARCO PUERTA DEL DIQUE DE CARENA 10 EN MARSELLA

T. DE FOLLEVILLE, SETEC TPI - C. RAULET, DIADÈS - B. QUENÉE, LERM

A petición del gran puerto marítimo de Marsella la agrupación de las empresas Diadès, Lerm, y Setec TPI realiza una peritación del barco puerta del dique de carena n° 10 para cerciorarse de su capacidad para realizar su función después de diez años sin ser utilizado. La misión se divide en tres fases, una inspección detallada que permite recopilar todos los desórdenes, ensayos de laboratorio sobre los materiales que constituyen la estructura y una comprobación de la estructura mediante un cálculo de los elementos acabados. La inspección detallada se completa con un diagnóstico específico del pretensado, realizado con imágenes gammagráficas y tiros de ballesta. □



1

© DOMINIQUE GALMICHE

UN NOUVEAU PONT DE PARIS À BEAUVAIS

AUTEUR : DOMINIQUE GALMICHE, INGÉROP

APRÈS DEUX ANNÉES DE FERMETURE À LA CIRCULATION DU PONT DE PARIS, LA VILLE DE BEAUVAIS PREND EN MAIN LA DÉFENSE DE SON TERRITOIRE ET DÉCIDE DE RETROUVER UNE ENTRÉE DE VILLE, HÉRITAGE DE SON HISTOIRE. AU TRAVERS D'UN CONCOURS DE CONCEPTION-CONSTRUCTION, ELLE S'ADJOINT LES SERVICES D'UN GROUPEMENT D'ENTREPRISES MENÉ PAR SOGEA PICARDIE POUR LA DÉCONSTRUCTION DE CETTE INFRASTRUCTURE MENAÇANT DE RUINE ET SON REMPLACEMENT PAR UNE STRUCTURE PLUS LÉGÈRE. CE PROJET RESTITUE LES LIAISONS ROUTIÈRES ET PAR MODES DOUX EN Y ASSOCIANT UN AMÉNAGEMENT URBAIN QUI REDONNE VIE À UN QUARTIER.

CHRONIQUE D'UNE INFRASTRUCTURE

La rue de Paris (RD 139E) à Beauvais emprunte le pont, baptisé pont de Paris depuis 1951, année de son inauguration. Cet ouvrage pose un axe historique sur le sol d'entrée Sud de la ville en déployant une vue sur l'église Saint-Étienne et la cathédrale Saint-Pierre. Il est un héritage du plan de reconstruction par faits de guerre et d'amé-

nagement de la ville de Beauvais. Le pont de Paris a fait l'objet d'un article dans la revue « La Technique des Travaux » de mai-juin 1952. Le 22 septembre 2010, la RD 139E est fermée à la circulation (figure 2). En effet, l'ouvrage en place est sous surveillance depuis les années 1990 et les conclusions des dernières expertises font apparaître la possibilité d'une rupture de la travée de rive, côté ville.

**1- Vue
d'ensemble.**

**1- General
view.**

Cette interdiction de circulation routière concerne aussi le boulevard Aristide Briand qui passe sous l'ouvrage côté ville.

En 2011, le Conseil Général rétablit la circulation sur ce boulevard par la mise en œuvre d'un étaielement sécurisant une passe charretière sous la travée déficiente.

La rue de Paris reste un axe prépondérant pour accéder au centre-ville.



2

© YANN COCHIN - VILLE DE BEAUVAIS

Sa fermeture entraîne de revenir au schéma de circulation d'avant-guerre lorsque cette route venant de Paris passait à niveau les voies ferrées de desserte de la gare de Beauvais avant d'atteindre le centre-ville.

Début 2012, le transfert de gestion du pont de Paris à la ville de Beauvais est entériné, successivement par la commission permanente du Conseil Général de l'Oise et par le conseil municipal. Ce transfert s'accompagne d'une participation financière du département pour la reconstruction.

La commune s'engage alors sur un programme de déconstruction-recons-

2- Vue du pont de Paris en 2012 fermé à la circulation.

3a & 3b- Images du concours.

2- View of Paris bridge in 2012, closed to traffic.
3a & 3b- Images from the design contest.

truction du tablier en conservant les appuis de l'ouvrage initial.

L'ouvrage franchit donc les voies ferrées de la ligne Paris-Beauvais, le Thérain affluent de l'Oise, le boulevard Aristide Briand et un parking public le long du Thérain.

Un concours de conception-réalisation est lancé en avril 2012 pour lequel le groupement Sogea - Poncin - Arval - Ingerop est déclaré lauréat en octobre (figures 3a et 3b).

L'ordre de service de démarrage des études et travaux est lancé le 5 novembre 2012 pour une fin de mission et donc une remise en circu-

lation, le 5 janvier 2013. L'entreprise annoncera dès le début son intention de ré-ouvrir le pont à la circulation pour la fin de l'année 2013.

D'UN TABLIER À UN AUTRE

Les données caractéristiques de l'ouvrage qui sont conservées sont sa longueur de 119 m entre culées avec quatre travées inégales de 25,50 / 33,50 / 33,50 / 25,50 m.

En plan il présente un rayon moyen de 175 m. Sa pente longitudinale est de 3%. La chaussée est en dévers constant à 3%. ▶

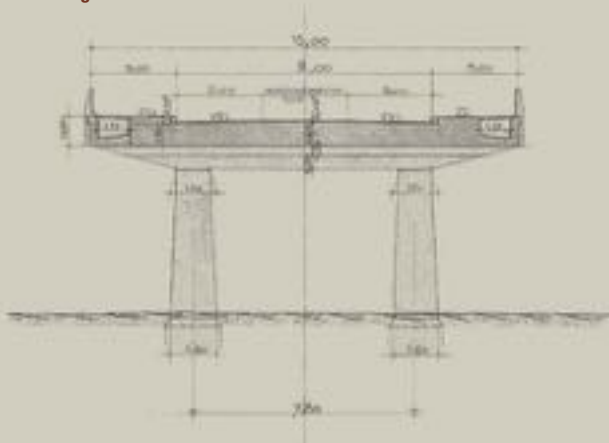


3a

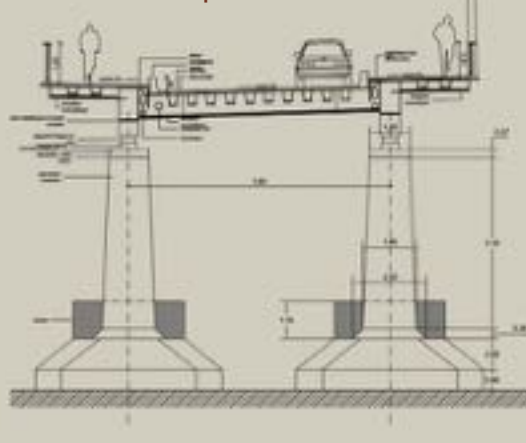


3b

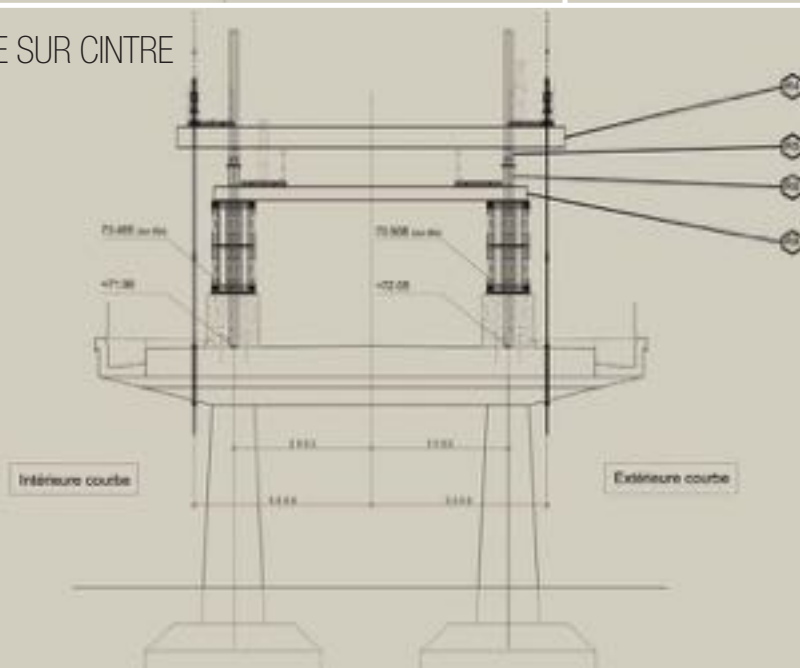
COUPE TRANSVERSALE
 sur l'ouvrage béton à démolir



COUPE TRANSVERSALE
 sur le nouveau tablier métallique



COUPE SUR CINTRE



4- Coupe transversale sur l'ouvrage béton à démolir.

5- Coupe transversale sur le nouveau tablier métallique.

6- Coupe sur cintre.

4- Cross section on the concrete structure to be demolished.

5- Cross section on the new steel deck.

6- Cross section on centering.

Le tablier en béton précontraint initial porte un profil en travers comprenant une chaussée de 9 m encadrée par deux trottoirs de 3 m (figure 4). Sa conception est l'œuvre de la S.T.U.P. et présente pour l'époque les fondements d'un prototype caractéristique : un ouvrage entièrement précontraint sans aciers passifs. Le tablier de l'ouvrage est une dalle d'épaisseur variable de 0,83 m en travée à 1,63 m sur piles. Transversalement, il comprend une section centrale précontrainte, de 12,40 m de large, encadrée par des caniveaux portés en console. Ce noyau porteur est entièrement précontraint longitudinalement (60 kg/m³) et transversalement (3,7 kg/m²) avec des unités STUP 12 Ø5. La précontrainte longitudinale se présente en

faisceau de 297 câbles dans les travées de rive et 336 câbles dans les travées médianes. La précontrainte transversale est disposée par pas de 1 m en section courante et complétée dans les entretoises sur piles. Les seules armatures de béton présentes sont en aciers doux. Elles sont implantées derrière les ancrages de précontrainte. Des aciers passifs sont mis en œuvre aussi dans les caniveaux, considérés comme des structures secondaires, en encorbellements. La particularité du tablier en béton est sa finesse et la conception demandée s'attend à voir respecter ce critère. Le programme pour le nouveau tablier demande une plateforme réduite avec une chaussée de 6 m au lieu des 9 m d'origine. Les trottoirs de 3 m sont conservés.

Le nouveau tablier est entièrement métallique avec une dalle orthotrope et des trottoirs en console (figure 5). La largeur réduite, conséquence du programme, est recentrée sur l'axe de l'ouvrage.

En conséquence, le dessous des poutres présente un gabarit amélioré par rapport à la solution béton.

Les têtes de piles sont donc rehaussées pour recevoir le nouveau tablier tout en conservant le profil en long de la chaussée supérieure.

DÉMOLITION DU TABLIER BÉTON

L'organisation du chantier démarre par les phases de démolition qui doivent libérer les assises pour le nouveau tablier. 1 450 m³ de béton et 85 t

de précontrainte sont à déposer et à recycler. Les points singuliers attachés à cette phase de démolition sont, par ordre d'importance, de ne pas gêner l'exploitation de la ligne ferroviaire, de conserver ouvert au trafic un des deux axes routiers sous l'ouvrage, de ne pas empiéter dans le domaine de la rivière du Thérain.

Après un désarmement complet de la dalle béton par suppression des trottoirs et des revêtements de chaussée, une démolition par phase, travée par travée, est engagée.

Afin de maintenir un niveau de sécurité maximum au survol de la voie ferrée et du cours d'eau, la travée survolant le domaine ferroviaire est suspendue à un cintre porteur appuyé sur les piles adjacentes (figures 6 et 7).



© DOMINIQUE GALMICHE
7



8



© DOMINIQUE GALMICHE
9



10

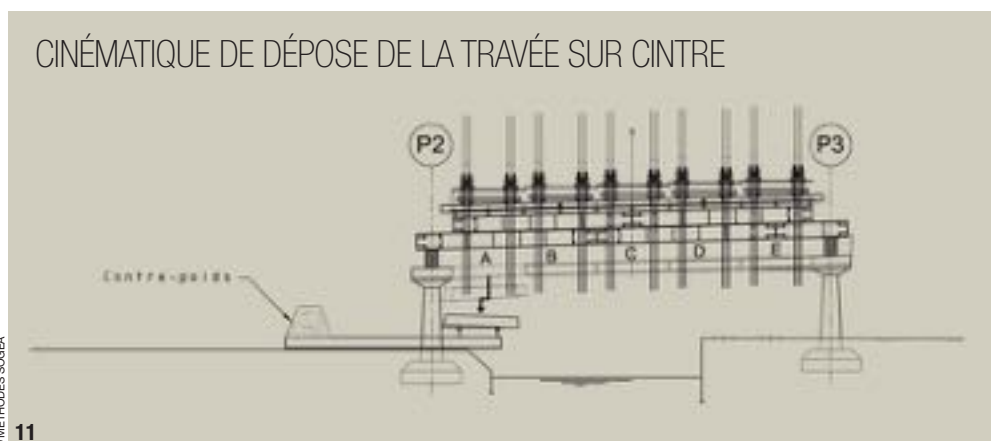
- 7- Cintre en place sur travée ferroviaire.
- 8- Travée nord en cours de démolition par grignotage.
- 9- Travée nord démolie et cintre porteur sur portée ferroviaire.
- 10- Travées 1 et 2 démolies - le faisceau des câbles reste visible.
- 11- Cinématique de dépose de la travée sur cintre.

- 7- Centering in place on rail span.
- 8- North span undergoing demolition by nibbling.
- 9- Demolished North span and loadbearing centre on rail span.
- 10- Demolished spans 1 and 2 - the cable bundle remains visible.
- 11- Diagram showing removal of the span from the centring.

Cette méthode de déconstruction demande un suivi pas à pas pour résoudre les éventuels aléas de chantier. La stabilité de l'ensemble du tablier est modélisée par le calcul en prenant en compte plusieurs hypothèses de précontrainte résiduelle. Chaque phase de déconstruction est introduite dans le modèle qui donne

en retour les déformées attendues et les tensions dans les suspentes sécurisant la travée enjambant le domaine ferroviaire. Les attendus donnés par la modélisation sont comparés aux déformées mesurées sur place et les tensions dans chaque suspente peuvent être modulées à l'aide de vérins disposés en tête.

La cinématique de démolition retenue comporte les phases successives suivantes :
 → Démolition de la travée Nord sur la rue de Bretagne par cisailles à béton (figures 8 et 9) ;
 → Démolition des travées au sud (figure 10) ;
 → Démolition de la travée suspendue par sciage et ripage. ▶



© MÉTHODES SOBEX
11



12



13

© DOMINIQUE GALLMICHÉ

La dernière travée est découpée en 5 plots de 200 t. Chacun est suspendu par 4 couples de barres à haute limite élastique (figure 11).

Une fois ces plots désolidarisés, ils sont ripés à l'aplomb d'une estacade disposée en rive nord de la rivière avant d'être descendus puis translattés et démolis au brise-roche (figures 12 et 13).

Quelques aléas ponctuent cette méthode de déconstruction :

→ Les découpes se révèlent plus longues à réaliser. Elles se font tout d'abord à la scie circulaire mais

celle-ci reste bloquée sur les câbles en grand nombre dans la structure. Au final le sciage par câble diamanté se révèle plus efficace.

→ La prise en charge du premier plot déclenche une fissuration dans le béton de ce plot qui peut à terme désolidariser l'élément en deux blocs et coincer l'ensemble sur ses suspentes sans possibilité de le rattraper. Chaque plot est alors renforcé par une charpente métallique fixée transversalement sur le dessus, entre chaque file de suspentes.

→ Le ripage des masses sur le chemin de glissement en tête du cintre présente des frottements plus importants que ceux attendus. Les outils de ripage sont alors adaptés sur le site pour donner plus de confort à cette opération.

La méthode une fois totalement maîtrisée reste spectaculaire.

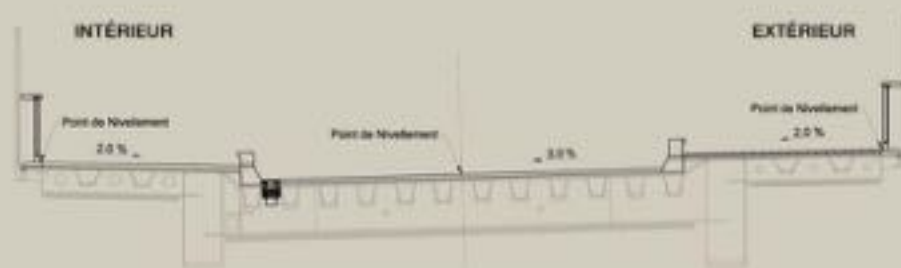
Le délai de réalisation est une inquiétude permanente car cela peut mettre à mal l'objectif de livraison du pont pour la fin de l'année en cours. Une fois les plots en travée déposés, délogés, démolis et évacués, le cintre est enlevé

par grutage ainsi que les chevêtres reliant les têtes des fûts de pile.

Les têtes des piles sont ensuite mises en état pour recevoir les nouveaux bossages et appareils d'appui.

La dérive de planning occasionnée par les aléas rencontrés en phase de démolition n'a pas perturbé les cycles prévisionnels de livraison et de montage du nouveau tablier sur le chantier. Avec un démarrage des travaux de démolition en février 2013, les appuis pour le nouveau tablier sont disponibles en juin 2013 et prêts à recevoir la charpente métallique.

COUPE TRANSVERSALE DU TABLIER MÉTALLIQUE



14

© MÉTHODES SOGEA

COUPE LONGITUDINALE DE L'OUVRAGE



15

© MÉTHODES SOGEA

12- L'estacade disposée en rive nord de la rivière réceptionne les plots de tablier béton découpés.

13- Les plots descendus sur l'estacade sont ensuite translattés pour être démolis au brise-roche.

14- Coupe transversale du tablier métallique.

15- Coupe longitudinale de l'ouvrage.

12- The jetty placed on the North bank of the river receives the cut-out concrete deck sections.

13- The sections lowered onto the jetty are then transferred to be demolished by rock breaker.

14- Cross section of the steel deck.

15- Longitudinal section of the structure.



© DOMINIQUE GALMICHE

CONSTRUCTION DU TABLIER MÉTALLIQUE

La superstructure du nouvel ouvrage est du type tablier métallique (figure 14). Il est constitué de deux poutres caissons, de hauteur variable, réunies par des pièces de pont formant entretoises et portant une dalle orthotrope. L'ouvrage de 119 m de longueur totale présente une courbure en plan de rayon moyen 175 m, une pente longitudinale de 3% et un dévers de 3% sur la chaussée. La largeur hors tout du tablier est de 13 m et se répartit en une chaussée de 6 m et deux trottoirs de 3 m.

Le choix d'une structure plus légère permet la conservation des appuis et de ses fondations. Les opérations de mise en place peuvent se faire au moyen de grues pendant des intervalles de coupures sur les voies franchies.

L'ouvrage comporte 4 travées continues, de longueurs respectives 25,50 - 33,50 - 33,50 - 25,50 m (figure 15). L'entraxe des poutres est de 7,80 m et correspond à celui des piles existantes. La coupe longitudinale de l'ouvrage s'inscrit entre le profil en long conservé de la voirie supérieure et les gabarits des voies franchies.

La conception et la réalisation du tablier métallique sont des prestations assurées par l'entreprise Poncin.

Le tablier est réalisé en deux phases sur le chantier. Un premier tronçon s'étend de la culée basse C0 jusqu'à la pile P2, avant le passage de la rivière, puis le deuxième depuis cette pile jusqu'à la culée haute C4.

L'organisation des tâches commence par une commande des matières en janvier 2013. Après deux semaines réservées au traçage, les travaux de fabrication démarrent en mai aux Ateliers Roger Poncin à Ocquier (Belgique) (figure 16). Une première expédition par camion est effectuée en juillet suivie d'un montage sur site jusqu'en septembre. La deuxième livraison de la charpente est calée de façon à assurer



17



18



19

16- Travaux dans les ateliers Poncin, la charpente est montée sens dessus dessous.

17- Pose de la charpente à l'aide d'une grue.

18- Tronçon central calé sur ses clames.

19- 1^{re} phase de grutage.

16- Work in the Poncin workshops; the structure is assembled upside-down.

17- Placing the frame by crane.

18- Central section fastened on its clamps.

19- First phase of crane handling.

© DOMINIQUE GALMICHE

la continuité des travaux de montage qui se terminent en octobre 2013.

Les travaux en atelier comprennent un montage pleine largeur de la structure sur la moitié de sa longueur.

La charpente est ensuite découpée en 3 tronçons suivant la largeur afin de pouvoir la transporter par camion dans le respect des gabarits routiers.

La mise en œuvre de la protection anticorrosion se fait en atelier. Le système

comprend trois couches dont la dernière de teinte blanche (RAL 9003) en finition brillante.

La livraison se fait par camions en convois exceptionnels depuis la Belgique. Chaque tiers de tranche de tablier est conditionné sur un camion. Les tronçons sont réceptionnés sur chantier et mis en place par grutage de la plateforme de camion sur des palées provisoires.



20



21



22

Les tronçons de rive sont préalablement calés sur ces palées puis la partie centrale vient s'insérer entre les deux, posés sur des clames (figures 17, 18 et 19).

Une fois l'ensemble de cette première phase de charpente en place, on opère un réglage et un calage en position avant de souder les tronçons entre eux. La deuxième phase de lancement de la charpente est ensuite exécutée jusqu'à la culée sud. Elle se fait par grutage de nuit pour traverser le domaine ferroviaire.

L'ensemble une fois en place, l'enchaînement des tâches peut se dérouler puisque nous disposons de la totalité du tablier à équiper (figure 20).

Cela concerne successivement la fin des soudages des tronçons entre eux, les travaux de reprise et les finitions de peinture, la mise en œuvre de l'étanchéité, les superstructures pour les plateformes définitives routières, piétonnières et cyclables.

AMÉNAGEMENTS

À la fin du mois d'octobre, le tablier est entièrement livré et positionné sur ses appuis définitifs (figures 21 et 22). Les travaux des différents corps d'état s'enchaînent par la suite pour une

20- Totalité de la charpente mise en œuvre.
21- Plateforme terminée.
22- Aménagements sous l'ouvrage.

20- The entire frame set up.
21- Completed roadway.
22- Development works under the structure.

livraison de l'ouvrage deux mois plus tard, le 20 décembre 2013.

La plateforme supérieure est rendue aux circulations. Chaque liaison reçoit un revêtement particulier. Un platelage en bois équipe le cheminement des piétons, un enrobé de 8 cm d'épaisseur est appliqué sur la chaussée circulée et en rive intérieure, le revêtement de la piste cyclable est en asphalte.

Le dessous du tablier est réorganisé en jardin avec la possibilité de rejoindre la plateforme supérieure par un escalier. □

PRINCIPALES QUANTITÉS DU TABLIER

CHARPENTE MÉTALLIQUE : 460 t
PROTECTION ANTI-CORROSION : 3 250 m²

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MÂÎTRE D'OUVRAGE : Ville de Beauvais
CONDUITE D'OPÉRATION : Services Techniques de la Ville
CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Apave
CSPS : Dekra
 GROUPEMENT CONCEPTEUR-CONSTRUCTEUR
SOGEA PICARDIE : mandataire
PONCIN : conception et réalisation de la charpente métallique
ARVAL : maîtrise d'œuvre intégrée architecture et aménagements
INGEROP : maîtrise d'œuvre intégrée infrastructures

ABSTRACT

A NEW PARIS BRIDGE IN BEAUVAIS

DOMINIQUE GALMICHE, INGÉROP

The city of Beauvais launched a design contest for a Design and Build contract to replace the Paris bridge closed to traffic since 2010. The Sogea-Poncin-Arval-Ingerop consortium was selected to perform the reconstruction works in October 2012. The works comprise demolition of the existing prestressed concrete deck while protecting the traffic underpasses and the river below, before rebuilding it on the preserved supports. The consortium proposed an orthotropic steel slab in place of the existing concrete deck. This choice was dictated by the constraints of the longitudinal profile and installation above the rail domain. □

UN NUEVO "PUENTE DE PARÍS" EN BEAUVAIS

DOMINIQUE GALMICHE, INGÉROP

La ciudad de Beauvais ha lanzado una licitación de Diseño-Realización para sustituir el puente de París cerrado a la circulación desde 2010. La agrupación Sogea-Poncin-Arval-Ingerop fue seleccionada para realizar las obras de reconstrucción en octubre de 2012. Las obras incluyen la demolición del tablero de hormigón pretensado existente preservando las circulaciones inferiores y el río antes de su reconstrucción sobre los apoyos conservados. La agrupación ha propuesto una losa ortótropa metálica para sustituir el tablero de hormigón existente. Esta elección ha sido dictada por las limitaciones de perfil longitudinal y de ejecución por encima del dominio ferroviario. □

TRÉSORS DE NOS ARCHIVES : LA RECONSTRUCTION DU VIADUC DE CARONTE

L. CARPENTIER, INGÉNIEUR À LA DIVISION CENTRALE DES OUVRAGES D'ART DE LA SNCF
TRAVAUX N°143 - SEPTEMBRE 1946

RECHERCHE D'ARCHIVES PAR PAUL-HENRI GUILLOT, DOCUMENTALISTE-ARCHIVISTE, FNTP



Corrosion, fissuration, alcali-réaction, fatigue et autres maux du fer, de la maçonnerie et du béton déterminent normalement la durée de vie des ouvrages. Mais il est une cause imprévisible et radicale qui balaie toutes les autres, c'est la destruction volontaire, notamment par fait de guerre.

Nous voici en revenus en 1946, juste au lendemain de la guerre, sur un pont-rail dynamité en 1944 par l'armée allemande.

Ce viaduc ferroviaire à double voie, sur la commune de Martigues, construit en 1914, permet à la ligne Miramas-L'Estaque de franchir le canal de Caronte qui relie l'étang de Berre à la Méditerranée. C'est, à l'époque, un des plus grands ponts à pivot du monde.

Il s'agit d'un pont-treillis en acier sur des piles en maçonnerie, d'une longueur totale de 972 m, comportant douze travées. Les deux travées cen-

trales de 57 m sont constituées d'un bloc-treillis de 114 m pivotant sur la pile médiane, permettant ainsi le passage des navires dont le tirant d'air dépasse 20 m. Toute une machinerie actionnée par moteurs thermiques et à air comprimé permet à cette travée de pivoter en cinq minutes et d'actionner l'éclissage des rails.

La destruction de la pile centrale servant de pivot ainsi que d'une travée courante nécessite d'importants travaux de démolition et de reconstruction. Le délai de la reconstruction, finalement décidée à l'identique c'est-à-dire avec la travée centrale pivotante, est long. Le maître d'ouvrage est alors amené à rétablir la circulation au moyen d'une travée levante provisoire. Celle-ci comporte un tablier Krupp provenant des prises de guerre. L'ouvrage est ainsi rendu à la circulation fin 1946. C'est en 1954 qu'il sera reconstruit dans sa configuration d'origine, par l'entreprise Schneider qui l'avait réalisé en 1914.

ABSTRACT

TREASURES FROM OUR ARCHIVES: RECONSTRUCTION OF THE CARONTE VIADUCT

TRAVAUX N°143 - SEPTEMBER 1946

L. CARPENTIER

Corrosion, cracking, alkali-aggregate reaction, fatigue and other problems affecting iron, masonry and concrete normally determine the lifetime of bridges. But there is an unforeseeable and radical cause which sweeps away all the others, namely deliberate destruction, notably through war. Here we are back in 1946, just after the war, on a railway bridge dynamited by the German army in 1944. This double-track rail viaduct, in the district of Martigues, built in 1914, carried the Miramas-L'Estaque line over the Caronte canal which links the Berre pond to the Mediterranean. At the time, it was one of the biggest swing bridges in the world. It was a steel truss bridge on masonry piers, of total length 972 m, comprising twelve spans. The two 57-metre centre spans formed a 114-metre truss unit pivoting on the middle pier, thus allowing the passage of vessels of clearance exceeding 20 m. A whole system of machinery actuated by heat engines and compressed-air motors allowed this span to pivot in five minutes and actuate jointing of the rails. The destruction of the central pier, serving as a pivot, and a main span, meant that major demolition and reconstruction works were required. It was finally decided to rebuild an identical bridge, i.e. with a pivoting centre span. The work took a long time to complete. The client therefore had to restore traffic with a temporary lift span. This included a Krupp deck coming from war spoils. The bridge was trafficable by the end of 1946. In 1954 it would be rebuilt in its original configuration, by the firm Schneider which had built it in 1914. □

TESOROS DE NUESTROS ARCHIVOS: LA RECONSTRUCCIÓN DEL VIADUCTO DE CARONTE

TRAVAUX N°143 - SEPTIEMBRE DE 1946

L. CARPENTIER

La corrosión, el agrietamiento, la fatiga y otras alteraciones del hierro, de la obras de fábrica y del hormigón suelen determinar la vida útil de las estructuras. Pero si hay una causa imprevisible y radical que desecha todas las demás es la destrucción voluntaria, en particular en las guerras. Estamos en 1946, inmediatamente después del final de la guerra, en un puente ferroviario dinamitado en 1944 por el ejército alemán. Este viaducto ferroviario de doble vía, en el municipio de Martigues, construido en 1914, permite que la línea Miramas-L'Estaque cruce el canal de Caronte que comunica la laguna de Berre con el mar Mediterráneo. En esta época, es uno de los puentes de pivotes más grandes del mundo. Se trata de un puente de celosía de acero sobre pilares de fábrica, de una longitud total de 972 m con doce tramos. Los dos tramos centrales de 57 m están constituidos por un bloque-celosía de 114 m que pivota sobre el pilar mediano, permitiendo de este modo el paso de los buques con una altura superior a 20 m. Toda una maquinaria accionada por motores térmicos y aire comprimido permite que este tramo gire en cinco minutos y que se accione el embrizado de los carriles. La destrucción del pilar central que sirve de pivote así como de un tramo corriente requiere importantes obras de demolición y reconstrucción. El plazo de la reconstrucción, que finalmente se decidió conservara la forma original, es decir, con el tramo central pivotante, fue largo, y el promotor de la obra tuvo que restablecer la circulación por medio de un tramo levadizo provisional. Este tramo contiene un tablero Krupp procedente de las incautaciones de guerra. El tráfico sobre el puente se restableció a finales de 1946. En 1954 fue reconstruido en su configuración original, por la empresa Schneider que lo construyó en 1914. □

ORGANE OFFICIEL TECHNIQUE DE
LA FÉDÉRATION NATIONALE DES
TRAVAUX PUBLICS ET DE SES
SYNDICATS AFFILIÉS

SEPTEMBRE 1946

TRAVAUX

REVUE MENSUELLE

ÉDITIONS • SCIENCE ET INDUSTRIE •

Ch. J. MEUDELOT
Directeur général

ORGANE OFFICIEL TECHNIQUE DE
LA CHAMBRE SYNDICALE DES
CONSTRUCTEURS EN CIMENT
ARMÉ DE FRANCE

N° 143

6, AVENUE PIERRE-I^{er} DE SERBIE — PARIS (16^e) — TÉLÉPHONE : KLÉBER 47-71 (3 LIGNES)

Un problème difficile : LA RECONSTRUCTION DU VIADUC DE CARONTE

Par L. CARPENTIER

Ingenieur à la Division centrale des Ouvrages d'Art de la S.N.C.F.

Nous avons publié dans notre numéro de juillet 1946, sous la signature de M. Robert Lévi, Directeur du Service Technique des Installations Fixes de la S. N. C. F., une très intéressante étude d'ensemble sur les moyens et méthodes de reconstruction des ponts de la S. N. C. F.

Cet exposé des principes généraux appliqués marque le début de toute une suite d'articles traitant en détail de réalisations particulièrement remarquables.

Il en est ainsi de l'article de M. Carpentier, qui décrit le rétablissement d'un ouvrage tournant détruit par explosion de la pile centrale à l'aide d'un ouvrage provisoire levant, en utilisant toutes les disponibilités et tout en ménageant la possibilité de reconstruire sans encombre l'ouvrage définitif.



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 2 bis

Vues d'ensemble de viaduc de Caronte avant sa destruction.



Fig. 3. — Le viaduc après sa destruction.

Le viaduc sur l'étang de Caronte, un peu en avant de l'étang de Berre, construit en 1900 pour le passage de la ligne de Miramas à l'Estaque, est un ouvrage métallique pour 2 voies, de 943 m de longueur. Il se compose de 2 travées fixes de 51,20 m, côté Port-de-Bouc, d'un pont tournant de 114 m de longueur en deux voies de 36,50 m de portée, franchissant à 23 m de hauteur le chenal navigable reliant l'Étang de Berre à la mer, et de 8 travées fixes de 82,50 m, côté Martigues (fig. 1 et 2).

C'est un ouvrage remarquable, à la fois par ses dimensions, par la manière heureuse dont il a été traité et par le site où il est placé.

Au mois d'août 1944, les Allemands coupèrent la travée fixe de 51 m, voisine du pont tournant et détruisaient le pont tournant lui-même par effondrement de la pile centrale en maçonnerie (fig. 3).

La ligne de Miramas à l'Estaque était coupée, en même temps que l'étang de Berre privé de communication avec la mer. En raison de l'aide que pouvaient apporter les installations de l'étang au port de Marseille, la tâche la plus urgente fut de dégager le chenal. La partie de la travée tournante qui l'obstruait fut découpée à l'explosif.

En ce qui concerne le rétablissement de la voie, l'idée d'un

pont provisoire ne fut pas retenue tout d'abord, en raison de la difficulté de franchir le chenal dont le libre usage devait être maintenu pour le passage des navires de haute mer, même pendant la durée des travaux. La construction d'un pont provisoire paraissait, en outre, devoir créer des difficultés considérables pour la reconstruction du pont définitif.

Au surplus, jusqu'à ces derniers mois, la grande artère Marseille-Lyon suffisait-elle à assurer le trafic.

Cependant l'accroissement des importations nécessaires à notre économie et l'amélioration du service voyageurs conduisaient bientôt à prévoir une circulation minimum de 130 trains par jour dans la vallée du Rhône et l'on décida, en septembre 1945, de rétablir la ligne empruntant le viaduc de Caronte, quelles qu'en fussent les difficultés, pour porter au plus tôt à quatre voies, la seule section à deux voies existant dans les relations vers Lyon, entre Miramas et l'Estaque (1) (fig. 4).

Les dispositions du pont provisoire étaient, toutefois, soumises aux deux conditions principales imposées à ce genre d'ouvrage : d'une part, elles devaient être réalisables dans le plus court délai, avec les matériaux disponibles; d'autre part, elles ne devaient pas gêner la reconstruction du pont définitif.

La première tâche était donc de définir les caractéristiques principales de ce dernier.

Nous exposerons, tout d'abord, les résultats de cette étude et montrerons ensuite quelle incidence ils ont eue sur les caractéristiques du pont provisoire. Nous verrons, enfin, comment s'est déroulée l'exécution de cette première phase de la reconstruction du viaduc de Caronte.



Fig. 4. — Carte de la zone sud-est.

(1) Rappelons que la liaison Lyon-Marseille est assurée par 4 voies principales : 2 voies sur chaque rive du Rhône de Lyon à Avignon ; 2 voies d'Avignon à Marseille via Arles et Rognac ; 2 autres voies d'Avignon à Marseille via Salon-Port-de-Bouc.

Choix du type d'ouvrage futur.

Aucune question ne se posait pour le rétablissement de la travée fixe, hormis celle, pourrait-on dire classique, de son relevage.

Nous verrons plus loin comment ce relevage a été réalisé.

Il en était autrement de la travée tournante.

Rappelons que celle-ci, construite en 1909 par les Etablissements Schneider, sous la direction de M. Séjourné, alors Chef du Service de la Construction du réseau P. L. M., avait fait l'objet d'une étude extrêmement poussée.

Mettant à profit une enquête faite en Amérique, en 1905, sur les ponts mobiles, M. Séjourné ne se décida pour le pont tournant qu'après comparaison avec les ponts basculants et levants qui connaissent pour le franchissement des passes navigables une faveur au moins égale.

Les ponts levants furent écartés en raison de l'inconvénient de fixer, *a priori*, une limite à la hauteur des mâts des navires appelés à emprunter le chenal.

Les ponts basculants — Scherzer ou Strauss — encore mal connus en France à l'époque de la construction du pont de Caronte, ne parurent pas devoir être adoptés pour un ouvrage sous chemin de fer d'aussi grande portée. Leur tenue au vent, dans cette région balayée par le mistral, n'aurait pas manqué, d'ailleurs, de poser de très sérieux problèmes. Au surplus, leur aspect industriel, pourrait-on dire, était difficilement conciliable avec le site du pont de Caronte que n'avaient pas encore troublé les installations actuelles du port.

Le pont tournant fut donc retenu. Sa réalisation a prouvé, semble-t-il, qu'il est possible de construire un pont métallique sans enlaidir un paysage.

L'ouvrage dégageant une hauteur libre de 23 m entre le niveau de la mer et le dessous des poutres, permettait le passage, sous le pont fermé, des bâtiments les plus courants à l'époque de sa construction, à tel point que l'on n'envisageait guère que 8 ou 10 ouvertures par an.

Dans ces conditions, on ne s'était pas attaché à réaliser un pont d'ouverture rapide et le moteur à essence de 100 chevaux qui l'entraînait par l'intermédiaire d'un appareil Janey, assurait la rotation de 90° en 8 minutes au moyen de 4 pignons dentés engrenant une crémaillère de 13,32 de diamètre.

Pendant la manœuvre, le pont dont le poids était de 1450 tonnes, reposait entièrement sur un pivot constitué par une lentille en bronze phosphoreux de 83 cm de diamètre, la stabilité étant assurée par dix-huit galets d'équilibre se déplaçant sur un chemin de roulement scellé dans le couronnement de la pile centrale.

Au moment de sa construction, le pont de Caronte était vraisemblablement le pont sur pivot le plus grand du monde.

Fermé et en service, le pont reposait sur les piles par l'intermédiaire de secteurs de calage à excentrique et, sur la pile de rotation, à la fois sur le pivot et des appareils d'ancrage articulés supportant à peu près exclusivement l'action des surcharges.

Des appareils de calage des appuis et d'éclissage des rails, mis en œuvre à l'air comprimé, complétaient le mécanisme, dont les principaux organes étaient réunis dans une salle des machines située au-dessus de la voie, entre les poutres principales, au droit de la pile centrale.

La durée totale d'ouverture et de fermeture atteignait ainsi une dizaine de minutes, non compris celle des manœuvres de sécurité entre gares.

Cette lenteur relative, sans inconvénient au moment de la construction de l'ancien ouvrage, serait tout à fait prohibitive

désormais, alors que l'on envisage une fréquence de 7 ou 8 manœuvres par jour.

Il faut donc réaliser un pont à ouverture ou fermeture rapide, de l'ordre de 2 minutes au plus. Les ponts levants et les ponts basculants, de construction moderne, répondent aisément à cette condition.

Toutefois, les raisons qui avaient fait écarter les ponts levants au moment de la construction, sont encore valables. D'autre part, si les ponts basculants ont connu, depuis lors,



Fig. 5. — Pont de Kincardine.

un essor remarquable, leur application au pont de Caronte présenterait des difficultés pratiques considérables par suite des dispositions des abords de l'ouvrage constitués par des travées métalliques de grande portée à 25 m au-dessus du sol, et en raison de son exposition au vent.

D'ailleurs, l'aspect de ces types d'ouvrages, dont la superstructure énorme aurait complètement rompu l'unité et la tranquillité des lignes de l'ensemble, aurait suffi à lui seul à les faire rejeter. Nous devons reconstruire, mais suivant le mot de Séjourné, nous n'avons pas le droit de « faire laid ».

Enfin, économiquement, la solution de l'ancienne travée tournante reste la plus intéressante, puisqu'elle permet le maximum de réutilisation : réutilisation de 300 à 400 tonnes de charpente métallique, et surtout réutilisation des fondations de la pile centrale, descendues à l'air comprimé à une profondeur de près de 11 m et restées pratiquement intactes.

Ces fondations n'auraient pu être remployées telles quelles dans le cas d'une travée basculante et encore moins dans le cas d'une travée levante qui eût exigé une largeur perpendiculaire aux voies beaucoup plus considérable.

Dans ces conditions, on a décidé de reconstruire une travée tournante ayant très sensiblement le même aspect que celui de la travée ancienne, mais comportant des dispositifs mécaniques tels, que sa durée d'ouverture et de fermeture ne dépasse pas les 2 minutes demandées.

Cette condition peut être aisément satisfaite avec un pont tournant reposant sur couronne de galets et entraîné par moteur électrique ou par moteur Diesel.

De nombreux exemples de ces types de ponts avaient déjà été notés par Séjourné au cours de son enquête en Amérique. Nous avons eu nous-mêmes, à l'occasion d'un récent voyage en Ecosse, la possibilité de visiter, près du célèbre pont du Forth, le pont de Kincardine, construit en 1936, donnant passage à une route de 9 m de largeur, de portée et de poids voisins de ceux du pont de Caronte (fig. 5). Ce bel ouvrage moderne, particulièrement soigné dans tous ses détails, est construit sur couronne de galets. Il est mû à l'électricité. La durée d'ouverture ou de fermeture est d'environ 1 minute 1/2 (1).

Nous obtiendrons un résultat analogue avec le nouveau pont de Caronte.

(1) Cf. Brown on Kincardine on Forth Bridge, Institution of Civil Engineers, Paper n° 5109, March 1937.

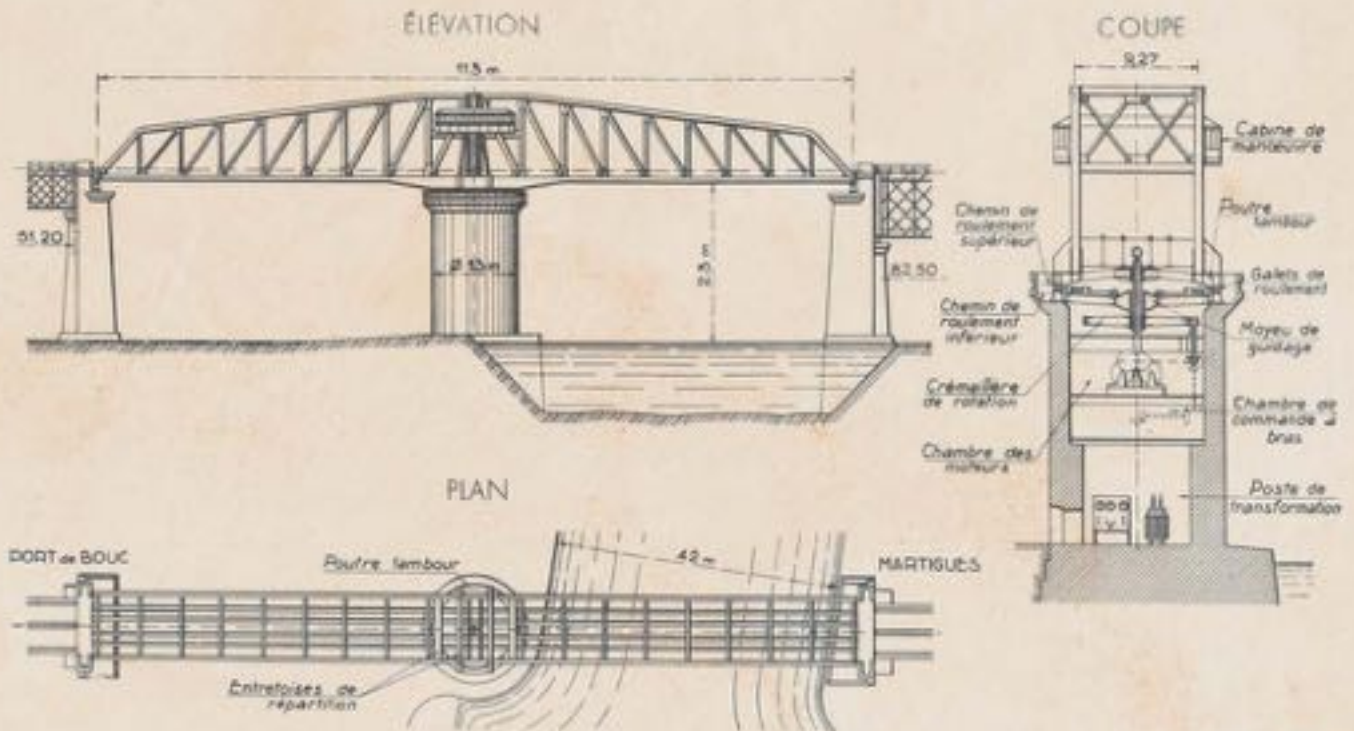


Fig. 6. — Travée tournante. Dispositions principales

Les dispositions principales envisagées sont les suivantes : (fig. 6) :

La charpente aura, très sensiblement, le même aspect que celle de l'ancien pont. Sur la pile, de robustes entretoises de près de 2 m de hauteur, reporteront en 8 points les charges sur un tambour en forme de poutre circulaire de 12 m de diamètre qui les répartira sur une batterie de 64 gaiets tronconiques de 50 cm de diamètre moyen. Ceux-ci seront chargés simultanément à 25 tonnes environ sous la charge permanente et à 50 tonnes sous la surcharge.

Nous nous sommes rendus compte que, du fait de la déformation des éléments de la charpente, il n'y avait à craindre ni martelage, ni surcharge excessive de certains gaiets au moment du passage des trains. Il a donc été jugé inutile de prendre des précautions spéciales dans le tracé de la poutre pour diminuer l'effet de continuité sur pile.

Les gaiets se déplaceront entre deux chemins de roulement de 12 m de diamètre :

Le chemin de roulement supérieur est fixé aux poutres de la travée par l'intermédiaire de la poutre-tambour reliée par des bras à un moyeu central claveté sur l'arbre vertical de transmission du mouvement de rotation. Cet arbre porte, à sa partie inférieure, la roue crémaillère de commande, attaquée par 4 pignons dentés recevant l'effort moteur par l'intermédiaire de trains d'engrenage de réduction et de différentiels;

— le chemin de roulement inférieur, scellé à la partie supérieure de la pile, est relié par des rayons à un moyeu servant de guide à l'arbre de commande.

La rotation sera assurée par un moteur électrique de 360 CV à la vitesse de 750 Tm, un deuxième moteur électrique étant en réserve. L'un quelconque de ces deux moteurs peut être alimenté en couplage Léonard, de manière à obtenir la progressivité de l'accélération ou de la décélération, soit par une génératrice pouvant développer 400 CV en pointe, accouplée à un moteur triphasé recevant le courant du réseau de l'Énergie Électrique du Littoral Méditerranéen, soit par une génératrice du même type que la précédente, accouplée à un moteur Diesel. Par sécurité, on prévoira également une commande à bras.

La durée théorique de la rotation sera de 96 secondes contre un vent debout de 60 kg : m², agissant sur une seule des deux volées de la travée tournante.

Cette hypothèse, qui est la même que celle adoptée lors de l'établissement de l'ancienne travée tournante, correspond à la vitesse du vent maximum compatible avec la navigation dans le chenal.

Le calage et l'éclissage sur culées seront réalisés comme

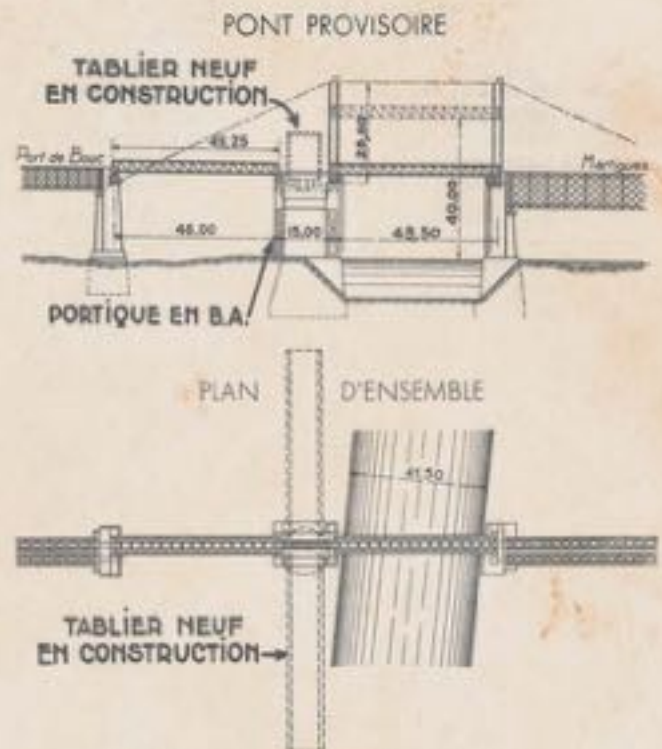


Fig. 7. — Dispositions d'ensemble du pont provisoire.

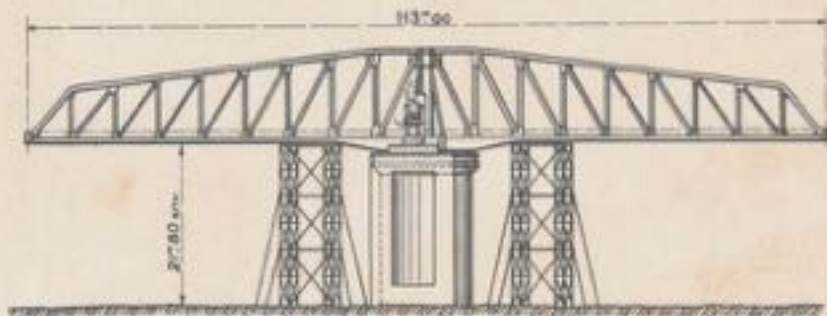


Fig. 8. - Principe du montage de la travée.

dans l'ancienne travée tournante, mais la commande en sera électrique.

Il est prévu 8 vérins de 220 tonnes pour le soulèvement de la travée. Une série de bagues de contact, entre le moyeu d'entraînement supérieur et le moyeu de guidage, assurera la liaison des circuits électriques entre les parties fixes et tournantes.

Par sécurité, on prévoira également la possibilité d'une manœuvre à bras.

La totalité des mécanismes et de l'appareillage électrique sera logée dans la tour qui sera complètement creuse. Nous en tirerons un double avantage : tout d'abord, la charge permanente sur les fondations anciennes sera réduite et l'on pourra, sans crainte, leur faire supporter les augmentations résultant de la mise en circulation des nouvelles machines lourdes à essieux de 23 et 25 tonnes ; d'autre part, la cabine située dans la partie supérieure de la travée tournante, à partir de laquelle toutes les commandes seront opérées, sera débarrassée de tout mécanisme encombrant ou malpropre et ne comprendra que des tableaux de manœuvres et de contrôle. Son aspect sera ainsi parfaitement net et moderne; elle assurera à l'agent, chargé des opérations, un séjour confortable et une vue dégagée à la fois sur la voie ferrée et sur la mer qu'il aura mission de surveiller.

Telles sont donc les dispositions principales du futur pont de Caronte. Malheureusement, il est à craindre que la construction d'un tel ouvrage ne soit fort longue dans la situation actuelle. L'approvisionnement et le réglage des mécanismes ne pourront être effectués rapidement. Nous n'espérons pas pouvoir achever le pont définitif avant trois ou quatre ans.

LE PONT PROVISOIRE

Le pont provisoire à établir immédiatement devait donc être durable. Il devait, en outre essentiellement :

- 1° comporter une travée mobile de 50 m environ ;
- 2° permettre la reconstruction de la pile future dont les caractéristiques définitives ne pourront être arrêtées qu'après achèvement des études du nouvel ouvrage ;
- 3° permettre le montage de la nouvelle travée tournante et sa mise en place avec le minimum de gêne pour l'exploitation du chemin de fer et du canal maritime.

Voici ce qui a été réalisé (fig. 7) :

La travée mobile est constituée par une travée levante pouvant être remontée jusqu'à 40 m de hauteur au-dessus du plan d'eau, de manière à dégager les plus hauts mâts des navires empruntant le chenal.

Cette travée levante est supportée par des pylônes métalliques appuyés, d'une part, sur la pile-culée côté Martigues, d'autre part, sur un portique en béton armé dont les pieds dégagent l'emplacement futur de la tour centrale.

Le portique en béton armé et l'espace qui sépare ce portique des travées d'accès métalliques sont franchis par deux tabliers provisoires de 14 et de 40 mètres de longueur environ.

Pour la reconstruction définitive, la travée tournante sera montée parallèlement au chenal, en porte-à-faux à partir de la tour centrale, la circulation des trains s'effectuant à travers la charpente en cours de montage (fig. 8).

Pour la mettre en service, il suffira de replier les ponts provisoires et de faire tourner la travée après avoir posé les quelques éléments de la charpente, dont la mise en place aura été différée en raison de la circulation des trains.

Pendant la préparation de l'ouvrage provisoire, on a procédé au relevage et à la réparation définitive de la travée d'accès effondrée.

DETAILS DE CONSTRUCTION

1. Portique en béton armé.

Le portique, qui forme l'appui central du pont provisoire, est constitué essentiellement par 4 montants en béton armé en forme de caisse creuse ouverte vers l'intérieur, réunis transversalement par deux poutres robustes destinées à supporter les charges des travées provisoires, et longitudinalement, par deux entretoises plus petites assurant la stabilité sous les efforts de freinage (fig. 9). L'entretoise, côté intérieur des voies, traversera la tour centrale future et son niveau a été choisi pour qu'elle apporte la gêne minimum à la construction.

Les montants du portique sont implantés sur les risbermes offertes par les fondations de l'ancienne pile. Côté mer, ils reposent sur les maçonneries mêmes qui limitent le chenal;

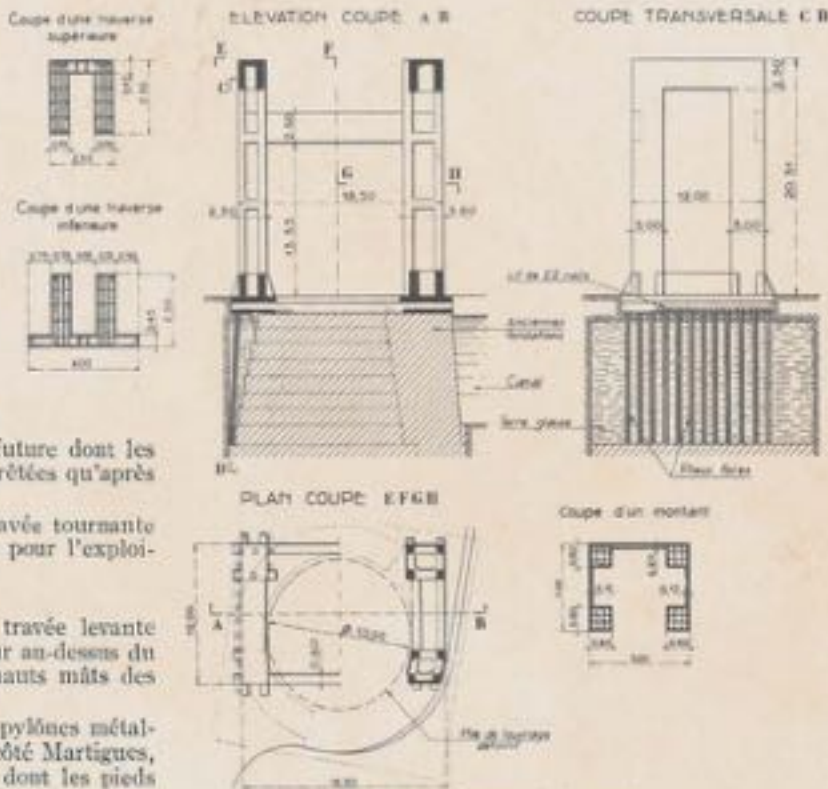


Fig. 9. - Portique en béton armé.

côté terre, ils sont appuyés à l'intérieur de l'ancien caisson métallique ayant servi à la construction de la pile.

On pensait que cette disposition éviterait tout travail de fondation important ; malheureusement, quand le déblaiement de la charpente métallique eût permis d'effectuer les reconnaissances nécessaires, on constata que la fondation de la pile comportait quelques grosses fissures en profondeur (1) et que, d'autre part, le remplissage du caisson métallique au-dessus des redans en maçonnerie de la pile, avait été réalisé à l'aide d'argile et de terre, sans consistance sérieuse.

Il nous fallut donc prendre des mesures dont l'exécution allongea notablement les délais prévus : création d'une semelle en béton armé de rails sous les montants, côté mer ; forage de pieux permettant de retrouver un appui sur les redans en maçonnerie de l'ancienne pile, côté terre.

II. Travée levante. (Tablier et supports.)

La travée levante, franchissant le chenal dans le prolongement de la voie côté Etang de Berre, s'appuie d'une part, sur la face avant du portique en béton armé, d'autre part, sur la pile-culée Martignies (fig. 10). Elle est constituée par un tablier militaire Allemand, type Krupp, de 40 m 50 de portée, qui put être heureusement mis à notre disposition par le

Chaque chevrete forme la partie inférieure d'un cadre dégageant le gabarit, et soutenu, dans l'axe de sa traverse supérieure, par deux câbles reliés à un contrepois se déplaçant le long de pylônes métalliques. Ces pylônes, de 1,80 x 2,30 m de côté et de 28,60 m de hauteur, servent à la fois de support aux poulies de contrepois et de guide au cadre pendant le mouvement. Les contrepois, réalisés par 50 tonnes environ de coupons de rails, sont extérieurs au portique, afin de mieux répartir la charge sur les pylônes. Cette disposition permet, en outre, de contreventer intérieurement les pylônes et d'y installer les mécanismes nécessaires (fig. 12).

À l'origine, nous pensions soulever le pont provisoire par des treuils agissant sur chaque culée et convenablement synchronisés. Finalement, sur propositions du constructeur, nous avons adopté une commande hydraulique nécessitant la mise en œuvre d'un moteur de toute petite puissance et apportant à la manœuvre une sécurité absolue (fig. 10).

Le mouvement est assuré par de l'eau qui provient d'un réservoir placé à la partie supérieure des pylônes et agit sur un piston plongeur soulevant le pont par l'intermédiaire d'une bielle articulée, reliée à un chevrete spécial placé sous les poutres du pont. Côté Martignies, la position de ce chevrete a été commandée par celle du parement de la pile-culée auquel le cylindre est fixé.

Le réservoir de 8500 l. environ contient l'eau nécessaire à deux manœuvres. La pression obtenue sur le piston, au début du soulèvement, est de 4,4 kg/cm² environ et, en fin de course, de 2,8 kg/cm² assurant sur le piston de 750 mm de diamètre un effort suffisant pour vaincre les frottements, ainsi que la prépondérance du poids du tablier sur les contrepois.

Pendant la descente, cette prépondérance est suffisante pour vaincre à son tour les frottements et chasser l'eau du cylindre dans le réservoir situé à la base des pylônes, d'où elle est remontée dans le réservoir supérieur par un petit groupe moto-pompe de 2 CV. Les vannes d'admission d'eau dans les canalisations sont commandées pneumatiquement à partir d'une cabine de manœuvre installée sur la pile-culée, côté Martignies.

Les tuyauteries d'air comprimé traversent la passe de navigation, soutenues par une suspension caténaire.

Théoriquement, les vitesses des pistons, situés à

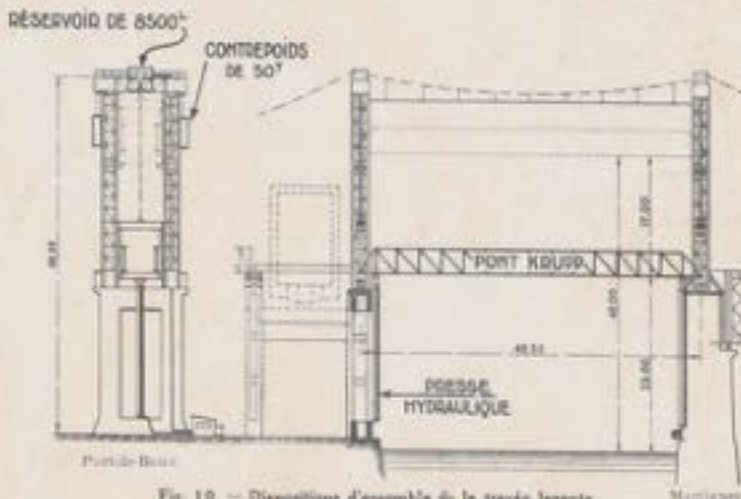


Fig. 10. — Dispositions d'ensemble de la travée levante.

Génie sur les prises de guerre. Ce tablier à voie inférieure, avec poutres latérales à treillis en N, en acier à haute résistance, convenait parfaitement à ce rôle en raison de ses caractéristiques et de sa légèreté (200 T.) (fig. 11).

Lorsqu'il est abaissé, il laisse un passage libre de 23 m au-dessus de la mer. Le dégagement de la hauteur de 40 m qui nous était demandée exigeait donc un levage de 17 m environ.

Pour ce faire, chaque extrémité des poutres du tablier repose sur un chevrete métallique par l'intermédiaire d'appareils d'appui permettant, à une extrémité, la libre dilatation mais interdisant tout mouvement vertical pour éviter des battements éventuels.

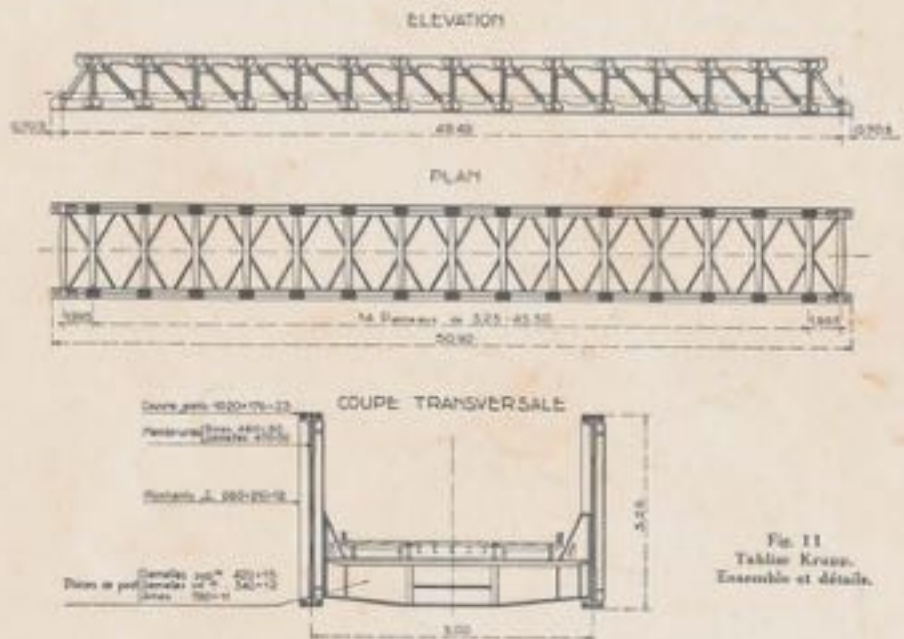
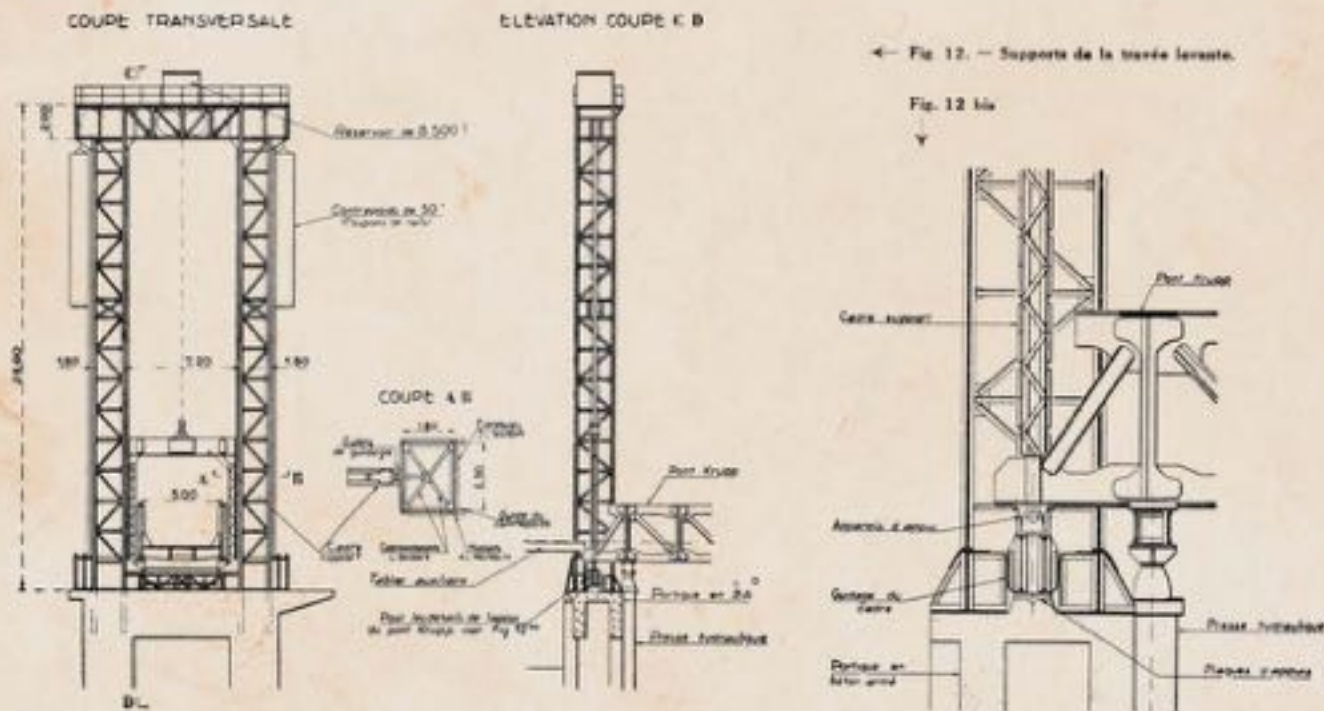


Fig. 11. Tablier Krupp. Ensemble et détails.

(1) Dont certaines devaient d'ailleurs être de formation ancienne.



← Fig. 12. — Supports de la travée levante.

chaque extrémité du pont, sont identiques. Nous prévoyons, toutefois, dans la cabine de manœuvres, un système de réglage indépendant pour chacun d'eux, de manière à opérer les corrections éventuelles nécessaires sur le vu d'un index indiquant, à tout moment, l'altitude et la pente du tablier au cours du mouvement. Par sécurité, quand l'index atteint la position « Danger », la canalisation commandant l'admission d'eau au piston en avance, est fermée automatiquement. Son mouvement est ainsi arrêté. Il reprend de même automatiquement, quand l'inclinaison du tablier a retrouvé une valeur acceptable.

Par construction, la sécurité est assurée puisque le pont est constamment maintenu par dessous par la pression de l'eau. Une rupture d'un ou même des 2 câbles de contre-poids n'aurait pour effet que d'augmenter l'effort sur les pistons et les cylindres dont les dimensions ont été établies pour cette hypothèse. Il n'y aurait pas non plus déséquilibre des cadres de soulèvement, puisque ceux-ci sont supportés au milieu de leur traverse supérieure.

Enfin, la sécurité est encore accrue par blocage du pont en position haute, à l'aide d'un verrou automatique commandé pneumatiquement.

Signalons, pour terminer, que l'eau utilisée pour la manœuvre sera glycérolisée pour parer au risque de gel et qu'on a prévu un dispositif sérieux de protection du cylindre ancré dans la pile-culée, côté Martigues, contre les chocs éventuels des bateaux empruntant le chenal.

Comme pour le pont tournant définitif, nous avons supposé que la navigation serait interrompue et, par conséquent, le mouvement du tablier n'aurait pas lieu par un vent de plus de 60 kg/m². Toutefois, par sécurité, les pylônes sont calculés sous un effort au vent de 100 kg/m²; le tablier étant en position haute et de 250 kg/m², le tablier étant en position basse.

Ces conditions sévères ont conduit à ancrer fortement les pylônes dans les portiques en béton armé, ce qui était fort simple, et aussi dans la pile-culée côté Martigues, ce qui était beaucoup plus difficile, puisqu'il s'agissait d'une fixation dans une maçonnerie en place extrêmement dure. Ils y sont ancrés à l'aide de fers descendant le long de la pile jusqu'à

une cote déterminée pour intéresser au soulèvement une masse de maçonnerie suffisante. Ces fers ont été mis en tension préalable pour éviter tout décollement des pieds des pylônes sous l'action du vent. En outre, des haubans de sécurité fixent les pylônes aux piles suivantes du viaduc pour parer à une rupture éventuelle des fers d'ancrage.

III. Travées fixes.

Les deux tabliers fixes franchissant, d'une part, l'intervalle compris entre les travées d'accès de 51,20 m et le portique en béton armé, d'autre part ce portique lui-même, sont constitués, l'un par un deuxième tablier Krupp de 48 m de portée analogue à celui du pont levant, l'autre par un petit tablier auxiliaire en poutrelles de 14 m de portée (fig. 10).

Ce petit tablier, de faible épaisseur, permettra de construire par dessous, sans trop de difficulté, les membrures inférieures du futur pont tournant.

EXECUTION DU PONT PROVISOIRE

I. Déblaiement.

La première tâche, sans laquelle nulle autre ne pouvait être entreprise, était le déblaiement des 1000 tonnes environ de la travée tournante effondrée, ou à tout le moins, le dégagement de l'emplacement de la pile centrale.

C'était un gros travail ; le poids du mécanisme et de la partie de la charpente encombrant la fondation de cette pile atteignait, à lui seul, plus de 500 tonnes (fig. 13). Il fallait en outre, le conduire avec le souci de sauvegarder le plus possible de pièces récupérables.

Nous avons, tout d'abord, espéré pouvoir utiliser un ponton de 450 tonnes du port de Marseille, ce qui eût permis le dégagement du chantier du portique dans un délai de quelques jours. Malheureusement, l'examen détaillé du problème montra que ce ponton ne pouvait être employé utilement et force nous fut de recourir aux méthodes habituelles, par découpage, dérivetage et enlèvement par petits éléments.

On rencontra une difficulté supplémentaire du fait de la nature de l'acier spécial à 50 kg/mm² de limite de rupture,

utilisé pour certaines pièces de la charpente et des rivets en acier ou nickel employé pour l'assembler. Pour gagner du temps, on a été malheureusement obligé de remplacer le déri-

vetage des pièces récupérables par le découpage, ce qui apportera une difficulté supplémentaire dans la réutilisation.

Le mécanisme, complètement modifié dans le pont définitif, a été sacrifié.

Le déblaiement de l'ancienne travée tournante a demandé à lui seul, plus de quatre mois.



Fig. 13. — Travée tournante : destruction.

II. Portique en béton armé.

L'exécution du portique en béton armé a surtout été influencée par les modifications qui ont dû être apportées au système de fondation primitivement prévu, comme il a été dit plus haut.

Les forages des pieux devaient, eux-mêmes, être retardés par la présence inattendue de débris de toute sorte : bois, charpente métallique, etc... dans l'argile de remplissage du caisson.

Il s'en est suivi un retard dans le programme qui a nécessité une exécution accélérée de la partie en élévation du portique. C'est ainsi que les montants, de 21,50 m de hauteur, ont été achevés en 40 jours (fig. 14).

III. Supports de la travée levante.

Après achèvement de la construction du portique en béton armé, côté Miramas, et de la préparation des enclaves des pylônes sur la pile-culée, côté Martigues, ces derniers, assemblés au sol, ont été montés d'une seule pièce à leur position définitive, à l'aide de mâts métalliques équipés de palans de 50 tonnes (fig. 15).

Cette méthode, qui permettait l'exécution préalable de la charpente métallique, réduisait ainsi au maximum les délais. Elle ne manquait pas, toutefois, de hardiesse en raison de l'exiguïté de l'emplacement disponible à près de 25 m de hauteur, pour l'installation de mâts ayant, eux-mêmes, plus de 30 m. Les mâts, accouplés 2 à 2, formaient bigue de levage haubannée dans le sens longitudinal.



Fig. 15. — Montage des pylônes métalliques.



Fig. 14. — Construction de portique en béton armé.

Nous avons, d'ailleurs, eu à enregistrer la rupture de l'une des bigues sur le portique en béton armé, à la suite d'une manœuvre intempestive des lambans. Cette rupture, sans causer d'accident de personne, entraîna, toutefois, un retard d'un mois dans la mise en service de l'ouvrage.

Après montage, le réglage des pylônes a été particulièrement délicat pour obtenir la verticalité et le parallélisme absolu des guides des cadres de soulèvement de la travée.

IV. Tabliers du pont provisoire.

Pendant ce temps, les tabliers de la travée fixe et de la travée levante, attelés par un élément Krupp d'une quinzaine de mètres, ont été montés sur les grandes travées d'accès de 82 m qui constituaient une excellente plateforme de lancement.

Au jour J, cet ensemble, chargé sur diplotrys spéciaux circulant sur la voie, halé par 2 treuils électriques de 12 T fixés sur les travées de 51 m opposées, a été tiré en une première phase jusqu'au portique en béton armé. Les tabliers passaient ainsi à l'intérieur des cadres de manœuvre de la travée levante, préalablement installés (fig. 16).

Pour éviter les inconvénients d'une flèche excessive au moment du porte-à-faux maximum de 50 m, le tablier de tête a été soutenu à 20 m du portique par l'une des bigues métalliques ayant servi au montage des pylônes.

Une deuxième opération identique a amené le tablier de la travée fixe à son emplacement définitif. Dès ce moment, le tablier de la travée levante a été désolidarisé des travées fixes et monté en position haute à l'aide de treuils (fig. 17). L'interruption subie par la navigation a pu ainsi être réduite au minimum : sept jours seulement. Encore, faut-il noter que les travaux de lancement ont dû être interrompus pendant deux jours, un mistral de plus de 90 km à l'heure, s'étant subitement levé alors que le tablier de tête était déjà en porte-à-faux de plus de 20 m.

Dans les jours suivants, on a procédé à la descente sur appuis du tablier de la grande travée fixe, au démontage de l'élément intermédiaire du pont Krupp et à son remplacement par le tablier en poutrelles (fig. 18), au réglage des contrepoids et des organes de manœuvre de la travée levante, réduits à des treuils en attendant la fourniture et la mise en place de la commande hydraulique. Pour cette phase intermédiaire et par mesure de sécurité, les contrepoids sont réglés de manière que le tablier puisse rester en équilibre pendant le mouvement. Aucune chute n'est donc à craindre en cas de rupture des câbles de treuils puisqu'il faut tirer sur le tablier, aussi bien pour le soulever que pour le descendre.

La montée maximum ou la descente, effectuée dans les conditions actuelles, demande 8 minutes environ.



Fig. 16. — Lancement du pont provisoire.



Fig. 17. — Premier levage de la travée levante.



Fig. 18. — Vue d'ensemble du pont provisoire.



Fig. 19. — Destruction de la travée d'accès de 51 m.



Fig. 20. — Coupure de la travée de 51 m. : détail.

RELEVAGE DU TABLIER DE LA TRAVÉE D'ACCÈS

Pendant les travaux de construction du pont provisoire, on a, comme il a été dit plus haut, relevé et réparé définitivement le tablier effondré de la travée d'accès.

Ce relevage, sur terre ferme, n'offrait pas de difficulté particulière, mais il montre bien toutefois, les précautions qu'il convient de prendre dans ce genre de travail.

Les 2 travées fixes, de 51,20 de portée, solidaires entre elles, sont constituées essentiellement par 4 poutres principales à treillis multiples, dont 2 sous chaque voie, de 5,42 m de hauteur hors cornière et de 103 m de longueur totale. Des entretoises sous rails et des longerons supportent les voies à la partie supérieure. L'ensemble des 4 poutres est contreventé verticalement et horizontalement par des croix de Saint-André.

Le tronçon tombé (fig. 19), d'un poids de 260 tonnes environ et d'une longueur de

40 m., reposait encore, quoique d'une façon fort précaire, sur les sommiers d'appui de la pile-culée, côté Martigues. Les environs de la coupure étaient déchiquetés sur quelques mètres, à la fois sur le tronçon effondré et sur la partie restée en place (fig. 20).

Le relevage a été fait à partir de deux poutres-console installées sur chacune des poutres extérieures du tablier resté en place, tout d'abord réparées et allongées de manière à surplomber le tronçon à terre (fig. 21). Le soulèvement était réalisé à l'aide de bielles pendantes à trous, formées d'éléments articulés de 2,51 m de longueur, suivant les indications du schéma. Le dispositif était étudié pour permettre le relevage par courses de 14 cm, correspondant à la montée unitaire des vérins, la reprise en fin de chaque course et le démontage des éléments de bielles, au fur et à mesure de la montée (fig. 22).

L'accrochage, sur les 2 poutres correspondantes du tronçon effondré, se faisait par l'intermédiaire d'un sabot articulé à la cardan, pour permettre au tronçon de se déplacer en tous sens au cours du relevage.

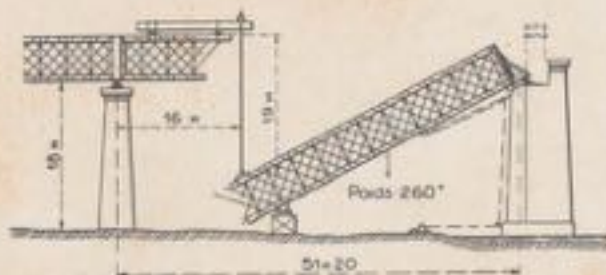
Sur la pile-culée Martigues, la première précaution prise fut d'allonger les poutres extérieures du tablier par des consoles métalliques dont l'emplacement avait été ménagé par démolition convenable de la maçonnerie.

Le tronçon étant calé à sa partie basse, on avait dès lors toute sécurité.

Un appareil d'appui à rouleaux fut disposé sous chacune de ces consoles, de manière à permettre le recul du tablier au moment de la montée et le maintien de la verticalité des bielles de soulèvement.

Le relevage proprement dit du tronçon, d'une hauteur de 18 m, s'est effectué, sans difficulté, en huit jours.

← Fig. 21. — Relevage de la travée d'accès



DISPOSITIF DE RELEVAGE

CONSOLES

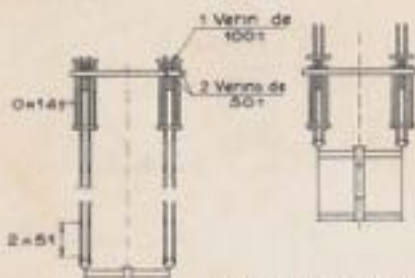


Fig. 22. — Dispositif de relevage de la travée d'accès de 51 m.



Fig. 23. — Travée d'accès après réparation.



Fig. 24. — Inauguration du pont de Caronte.

Après remise à niveau, on a immédiatement réalisé la jonction des poutres extérieures du tablier, puis entrepris la réparation définitive (fig. 23).

Les opérations de reconstruction du pont de Caronte se sont déroulées au milieu des difficultés bien connues de tous ceux qui ont actuellement à reconstruire : matériel, personnel, coordination des efforts d'entreprises diverses. Malgré les dangers que présentaient les travaux exécutés dans un espace restreint, souvent difficilement accessible et à grande hauteur au-dessus de l'eau, le seul incident notable à signaler a été celui survenu au cours du montage d'un pylône métallique, que nous avons signalé plus haut.

Grâce aux efforts de tous : Entreprise Schneider pour le déblaiement de la travée tournante et le relevage de la travée fixe — Entreprise Boussiron pour la construction des portées en béton armé — Entreprise Fives-Lille pour la construction des pylônes et du mécanisme de la travée levante — Génie militaire enfin, pour le montage et le lancement des tabliers Krupp, le pont provisoire de Caronte, dont les travaux n'avaient été entrepris qu'en octobre 1945, était remis en service le 10 juillet dernier (fig. 24), soit en moins

de 10 mois, études comprises, le déblaiement ayant nécessité à lui seul plus de 4 mois de travail.

Illustrant de manière frappante, la difficulté rencontrée dans toute la reconstruction provisoire de concilier la nécessité d'aller vite et celle de ne pas gêner la reconstruction définitive, le pont de Caronte est l'un des derniers ponts provisoires dont la construction ait été prévue sur nos lignes de chemin de fer (1).

Tenu compte de son importance (2) et des problèmes qu'il a soulevés, on peut donc, à juste titre, le considérer comme le couronnement de la première phase des travaux de reconstruction des Ouvrages d'Art de la S. N. C. F.

L. CARPENTIER.

(1) Il ne restera guère à mettre en service que le pont d'Orival sur la Seine, entre Oissel et Elbeuf. Bien que comprenant un important ouvrage de 360 m de longueur, fléchi en déviation, le pont d'Orival est du type classique des ponts à travées d'une vingtaine de mètres, appuyés sur piles métalliques, type pont d'Argenteuil, pont de la Vendée, etc.

(2) La travée levante de Caronte est la plus grande de France et l'une des plus grandes d'Europe au point de vue portée et hauteur de levage.



Fig. 25. — Passage d'un bateau sous la travée levante.