

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

PATRIMOINE & REHABILITATION. PIPELINE : DIAGNOSTIC ET REHABILITATION. CHATEAU DE VERSAILLES : CONSTRUCTION D'UNE GALERIE SOUTERRAINE. REHABILITATION D'UNE FRICHE INDUSTRIELLE. LA GESTION DES INFRASTRUCTURES SERBES : SYSTEME FRANCAIS. MUSEE DU LOUVRE : ESPACES DES ARTS DE L'ISLAM. DE LA TOUR AXA A LA TOUR FIRST. PATRIMOINE D'OUVRAGES D'ART : UNE SITUATION CRITIQUE

N°882 JUILLET / AOÛT 2011



NOUVEAU DÉPARTEMENT DES ARTS DE L'ISLAM AU MUSÉE DU LOUVRE
© LUC BENEVELLO - PHOTOTHÈQUE VINCI

LES TRAVAUX PUBLICS
FÉDÉRATION NATIONALE

Directeur de la publication
Patrick Bernasconi

Directrice déléguée
Rédactrice en chef
Mona Mottot

3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. : +33 (0)1 44 13 31 03
Email : mottotm@fnfp.fr

Comité de pilotage

Laurent Boutillon (Vinci Construction Grands Projets), Jean-Bernard Datry (Setec TPI), Stéphane Monleau (Solétanche Bachy), Louis Marracci (Bouygues), Jacques Robert (Arcadis ESG), Claude Servant (Eiffage TP), Philippe Vion (Systra), Jean-Marc Tanis (Egis), Michel Duviard (Egis), Florent Imberby (Razel), Mona Mottot (FNTP)

Ont collaboré à ce numéro

Rédaction

Bernard Aldebert, Barbara Boisnard
Marc Montagnon, Monique Trancart
Secrétariat de rédaction
Julia Deck

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
Email : revue-travaux@cometcom.fr

France (10 numéros) : 190 € TTC
International (10 numéros) : 240 €
Enseignants (10 numéros) : 75 €
Étudiants (10 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)

Publicité

Régie Publicité Industrielle
Christophe Bouthier
9, bd Mendès France
77600 Bussy-Saint-Georges
Tél. : +33 (0)1 60 94 22 27
Email : bouthier@rpi.fr

Site internet : www.revue-travaux.com

Réalisation et impression

Com'1 évidence
8, rue Jean Goujon - 75008 Paris
Tél. : +33 (0)2 32 32 03 52
Email : contact@com1evidence.com

Maquette

Idé Edition

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°0111 T 80259
ISSN 0041-1906

INSPECTER, ENTREtenir, RÉPARER NOTRE PATRIMOINE D'OUVRAGES D'ART



© DR

Il ne peut échapper à personne que nous avons construit en France la plus grande partie des infrastructures dont nous avons besoin - autoroutes, nouvelles lignes de chemin de fer... - et que le rythme de la construction ne pourra que se ralentir, même si de nouveaux besoins se feront jour, par exemple pour développer les transports en commun dans les grandes agglomérations.

Mais, en contrepartie, nous allons devoir gérer un patrimoine important qui va petit à petit prendre de l'âge.

Malheureusement, la faiblesse des ressources publiques - qu'il s'agisse de l'État ou des collectivités territoriales -, qui conduit de plus en plus à privilégier les concessions et les partenariats public-privé, tend aussi à réduire les dépenses d'entretien ; des opérations sont reportées, et l'on voit de plus en plus souvent apparaître des trous dans les chaussées, ce dont nous avons perdu l'habitude et qui est un signe très clair de la dégradation des finances publiques.

Il en va tout autrement sur les autoroutes concédées, les péages assurant le financement et le contrôle de l'État imposant le maintien du niveau de service. Un peu plus de quarante ans après l'apparition controversée des autoroutes à péage, l'histoire a donné raison à ceux qui les ont imposées.

Il est indispensable d'assurer l'entretien de nos infrastructures - et en particulier de leurs ouvrages d'art, qui sont les seuls qui nous intéressent ici - si nous ne voulons pas les voir se dégrader progressivement, avec, pour l'avenir, une alternative désas-

treuse entre laisser le niveau de service se dégrader ou devoir investir massivement pour les remettre à niveau.

Il est donc indispensable que les responsables politiques prennent la mesure du problème et trouvent les financements nécessaires à la maintenance de nos réseaux, routiers et ferroviaires.

Mais il faut aussi que l'administration - au sens large - et la profession s'organisent pour faire face à l'inévitable évolution qu'implique la réduction du volume des travaux neufs et l'accroissement des besoins d'entretien et de réparation.

Il faudra de plus en plus inspecter, entretenir et réparer.

INSPECTER

Seuls quelques très grands ouvrages - le pont de Normandie, le viaduc de Millau... - font l'objet d'un véritable monitoring.

En notant au passage qu'on ne tire pas assez de bénéfices des mesures et des observations qui sont faites, ce qui demande un peu - très peu - d'argent et quelques compétences.

Il est hors de question d'assurer le monitoring de tous les ouvrages, ou même de tous les grands ouvrages. Mais il faut - comme cela a déjà été bien engagé - faire inspecter les ouvrages par des ingénieurs qualifiés et constituer des dossiers d'ouvrage précis et complets, en profitant des progrès des systèmes d'archivage informatique (tout en se méfiant de l'évolution des matériels qui peut faire perdre toutes nos données ; souvenons-nous du microfichage...). Et dans certains cas, lorsque cela paraît nécessaire, il faut mettre en place une instrumentation adaptée, qui doit être limitée à des objectifs clairement définis si l'on veut pouvoir en interpréter les résultats.

ENTREtenir

Il y a bien entendu différents niveaux d'entretien, et la limite avec les réparations n'est pas toujours évidente. Selon les niveaux, l'entretien peut être assuré en interne par les équipes du maître d'ouvrage ou faire l'objet de marchés.

Mais ce qui est essentiel, c'est que chaque maître d'ouvrage dispose d'une

équipe responsable de la gestion de ses ouvrages, organisant les inspections, assurant l'archivage des données, et déclenchant les opérations d'entretien qui doivent faire l'objet de bilans complets. Cette équipe est la mémoire du réseau. Il faut à la fois de la compétence et de la continuité.

RÉPARER

Les opérations de réparation sont évidemment plus complexes.

Il existe aujourd'hui des documents techniques de qualité. Mais ce n'est pas suffisant.

Il faut organiser les opérations comme on le fait pour des travaux neufs, et respecter les étapes logiques : alerte aux travaux, diagnostic, étude technique et consultation des entreprises spécialisées.

C'est d'autant plus important que, dans ce domaine, différentes solutions peuvent être envisagées et proposées par les entreprises. Sans compter qu'il peut arriver que la meilleure solution reste le remplacement de l'ouvrage.

Je pense donc qu'un maître d'ouvrage qui ne dispose pas d'un service qualifié doit faire appel à un assistant - l'assistant du maître d'ouvrage de façon tout à fait classique - qui l'aidera à identifier les problèmes à résoudre, à choisir des laboratoires et un bureau d'études spécialisés pour établir les diagnostics indispensables, puis à sélectionner un maître d'œuvre qui établira un projet de réparation et organisera un appel d'offres de travaux, permettant, le cas échéant, des solutions variantes.

Bien sûr, je ne fais ici qu'enfoncer des portes ouvertes. Mais l'importance de l'évolution de nos activités dans les années à venir impose une réelle adaptation de notre façon d'aborder ces problèmes, et de mettre au premier plan la gestion du capital que représentent nos infrastructures.

MICHEL VIRLOGEUX
INGÉNIEUR CONSULTANT
MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

DE L'IMPORTANCE DU PATRIMOINE



© DR

Patrimoine, ou selon le Ministère de la Culture les Patrimoines, s'accorde parfaitement à l'idée de transmission. Comme si l'héritage premièrement apanage des notaires, était généralisable au point de s'appliquer à l'ensemble des œuvres et messages laissés à l'avenir par les générations qui l'auraient donc construit, élevé au sens médiéval du jeune homme perché sur l'épaule paternelle : portés par les géants (l'ensemble de l'humanité) dont ils sont issus, les apprentis seront en mesure de porter plus loin leurs yeux. On comprend de la sorte que s'intéresser aux monuments construits, en usage ou non, constitue un phénomène naturel : il s'agit tout à la fois d'avoir un rapport concret et physique au passé formateur et de ne négliger ni l'œuvre ancienne ni la plus récente afin d'assurer à la filiation sa continuité.

Encore faut-il considérer le patrimoine dans sa valeur exemplaire. On est amené dans le cadre d'une recherche en perpétuel mouvement à distinguer les deux aspects : d'une part, le repère ou le phare, le jalon, le lieu de l'invention et du prodige, d'autre part, l'ensemble qui, peu à peu humanisé par les services rendus à l'individu et la collectivité, représente et devient la Ville. La notion de patrimoine ordinaire a aujourd'hui autant d'importance que celle de patrimoine monumental et fondateur, type Unesco.

L'économie fondée sur l'écologie urbaine et la durabilité transforme nos regards et nos imaginaires. Avec les deuxièmes peaux qui, de tous temps, ont rhabillé les façades, avec le verbe « revisiter », si souvent évoqué, des lofts à ces interventions qui jouent sur la lumière pour donner une nouvelle vie aux sites industriels, on voit bien que le recyclage devient une règle fertile.

Les cycles du goût nous ont valu une ville blanche après avoir été polychrome, la cité qui redécouvre sans fin le béton après avoir eu le culte de la pierre, le mur où la fenêtre et le miroir dialoguent de manière savante avec les menuiseries de bois et de métal dans des bâtiments-sculptures dont l'informatique et les technologies, matériaux et mises en œuvre, font des œuvres signées. L'architecte artiste, ainsi s'identifiait Hector Guimard, a toujours dessiné en trois D. Le Monument fait la Ville qui le fit.

Les « rangs » qui, au XVII^e siècle, marquent la francisation de Lille, proposant des ensembles homogènes au lieu de la diversité de la proposition privée, manifestent la grandeur royale autant que l'introduction d'un présent, d'une « modernité » dont la beauté du dessin et des dimensions explique la résistance au temps. La vision d'André Malraux concernant la Ville et les symboles de pouvoir dont elle est porteuse, nous suggèrent la valeur politique des Patrimoines. Un exemple le démontre : les points de vue émis à propos des Messageries d'Austerlitz, rebaptisées Halles Freyssinet en l'honneur de son concepteur, l'ingénieur Eugène Freyssinet, qui y a mis au point son procédé de brevet précontraint. Tout garder, n'en garder qu'une partie pour satisfaire besoins d'hier et de demain, telle est la question qui se pose désormais, alors que la destination postale des débuts a trouvé sa suite dans une adaptation à l'évènementiel, respectueuse du bâtiment et révélant les potentiels du territoire en écho avec la demande socio-culturelle.

On appréciera que la problématique qui vient d'être évoquée accompagne une reconnaissance du travail des ingénieurs qui associent les forces aux formes, les recherches aux services de manière à illustrer la relation étroite entre les concepts de Travaux et Patrimoines à cette liaison contemporaine entre Aménagement du Territoire et Cultures.

PASCAL PAYEN APPENZELLER
EXPERT STRATIGRAPHIE DU PATRIMOINE

LE PATRIMOINE, ENJEUX ET DÉVELOPPEMENT L'EXEMPLE DE LA VILLE DE VERSAILLES.

POUR ÊTRE DURABLEMENT SAUVEGARDÉ, LE PATRIMOINE BÂTI DOIT CONTINUER À VIVRE, AVOIR UNE FONCTION, S'INSCRIRE DANS LES PROJETS DE DÉVELOPPEMENT URBAIN ET VEILLER À SA VIABILITÉ ÉCONOMIQUE. CECI DONNE LIEU À DES PROJETS PATRIMONIAUX TRANSVERSAUX FORTEMENT TERRITORIALISÉS, ARTICULANT DES DIMENSIONS HISTORIQUES, CULTURELLES, SOCIALES, ÉCONOMIQUES, TOURISTIQUES...

ENTRETIEN AVEC FRANÇOIS DE MAZIÈRES, MAIRE DE VERSAILLES, PRÉSIDENT DE LA CITÉ DE L'ARCHITECTURE ET DU PATRIMOINE ET PRÉSIDENT DE VERSAILLES GRAND PARC. PROPOS RECUEILLIS PAR MONA MOTTOT



© MÉLANIE FREY

POUR FRANÇOIS DE MAZIÈRES, LA VALORISATION DU PATRIMOINE S'INSCRIT DÉSORMAIS DANS UNE PERSPECTIVE DE POLITIQUE INTÉGRÉE, D'ATTRACTIVITÉ ET DE DYNAMISATION DES TERRITOIRES. GRÂCE À SA TRIPLE CASQUETTE -LE MAIRE DE VERSAILLES EST ÉGALEMENT PRÉSIDENT DE LA CITÉ DE L'ARCHITECTURE ET DU PATRIMOINE ET PRÉSIDENT DE VERSAILLES GRAND PARC- FRANÇOIS DE MAZIÈRES MET À PROFIT SA FORTE CONNAISSANCE DU MONDE DE L'ARCHITECTURE ET DE L'URBANISME, ET SA PROXIMITÉ AVEC LES PRÉOCCUPATIONS D'UNE VILLE COMME VERSAILLES, POUR RÉUSSIR SES MULTIPLES MISSIONS.

Quelles sont à votre avis les différentes composantes du patrimoine aujourd'hui ?

Depuis une trentaine d'années, la conception du patrimoine a beaucoup évolué et s'est considérablement enrichie, grâce à la mondialisation et à l'intérêt croissant pour les cultures populaires et l'ethnologie. Au-delà du **patrimoine historique et**

architectural ancien (monuments religieux, sites archéologiques...), cette conception s'est élargie au **patrimoine architectural moderne** (musées d'art et d'histoire, bâtiments d'architecture contemporaine, tours grande hauteur...). La notion de **cité-jardin** est plus que jamais d'actualité et prend une dimension de plus en plus importante

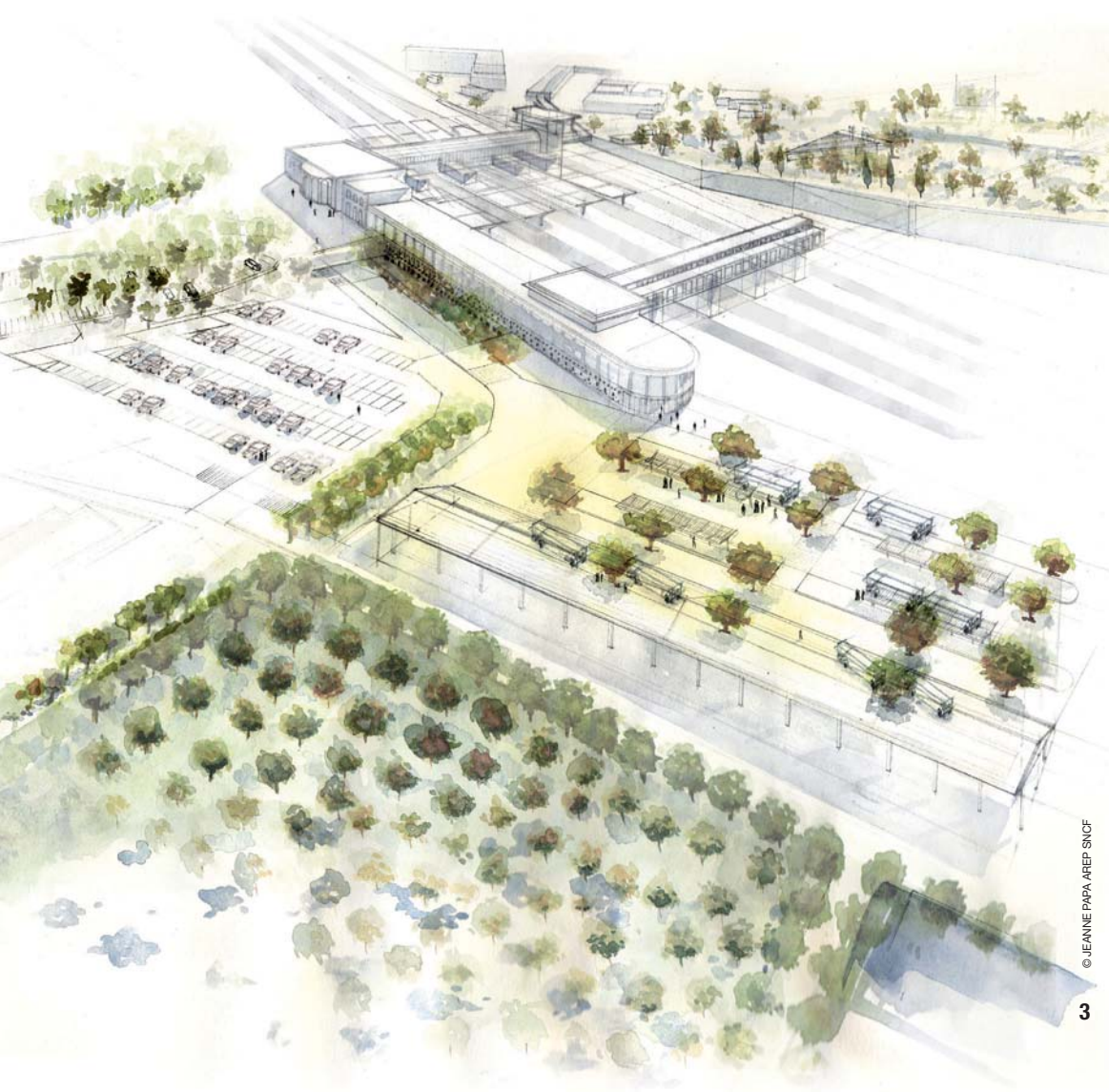
© VILLE DE VERSAILLES



1



2



© JEANNE PAPA AREP SNCF
3

1940 (National Trust), la France n'a commencé à s'y intéresser qu'à partir des années 1990. C'est ainsi que dans les régions industrielles les plus anciennes comme la Lorraine et le Nord-Pas-de-Calais, des sites miniers sont désormais classés monuments historiques et des fours à chaux préservés avec autant de soin que des châteaux forts. Enfin, il ne faut pas oublier le **patrimoine immatériel** que constituent les traditions populaires écrites et orales, le savoir-faire artisanal, les fêtes, foires et manifestations culturelles et artistiques anciennes ou contemporaines.

Quels sont les enjeux de la valorisation et du développement du patrimoine pour les territoires ?

Il est désormais reconnu que le patrimoine constitue une véritable ressource en soi, notamment au plan touristique et donc économique. Avec plus de 75 millions de touristes étrangers par an, la France est considérée comme la première destination touristique dans le monde, grâce à la richesse de son patrimoine. Le tourisme constitue un secteur économique de première importance au plan national, et son poids dans le produit intérieur brut (PIB) est estimé à plus de 6 % selon l'INSEE. On peut véritablement parler de consommation culturelle grâce aux recettes liées à l'exploitation du patrimoine (billetterie, boutique ou librairie, visites guidées payantes, organisation d'événements...). Par conséquent, la préservation et la valorisation du patrimoine contribuent avec force à l'attractivité de nos territoires, notamment sur les plans touristique et culturel. Ce sont là, bien sûr, des atouts majeurs pour

avec la part croissante des espaces verts dans les projets d'urbanisme de nos villes. Voyez le succès du Château et Jardins de Villandry en Touraine, ou encore le Domaine de Chaumont-sur-Loire qui fait désormais partie d'un réseau européen d'établissements prestigieux, reconnus par le ministère de la Culture et de la Communication, ayant tous pour missions la sauve-

- 1- Hôpital Richaud (avant).
- 2- Hôpital Richaud (après).
- 3- Projet de la gare des Chantiers.
- 4- Cours des Senteurs (avant).
- 5- Cours des Senteurs (après).

garde du patrimoine, un projet artistique innovant et l'enracinement de leur développement culturel. On assiste également à l'émergence du concept de **patrimoine industriel et urbain récent** concernant les cités minières, les usines et bâtiments industriels. Si l'Angleterre a entrepris d'étudier et de rénover son patrimoine industriel dans les années

© VILLE DE VERSAILLES



4



5

des zones rurales quelquefois en difficulté mais riches, bien souvent, d'un patrimoine considérable qui devient vecteur de développement local. C'est le cas notamment du Périgord ou de la Savoie.

Autre enjeu économique important, la création d'emplois. Ainsi par exemple, dans le cadre d'un chantier de réhabilitation d'un patrimoine pour le maintien de son intégrité en tant que bien culturel, il y a création d'emplois directs et indirects. Une étude réalisée il y a quelques années par l'INSEE a démontré que pour 1,5 million d'euros de travaux réalisés sur du bâti ancien, il n'y a pas moins de 45 emplois créés ou maintenus dans le seul secteur du BTP.

Mais le patrimoine peut également se trouver au cœur d'un projet de développement plus large, comme la valorisation qui s'attache à lui retrouver une fonction. C'est le cas de l'ancien hôpital royal Richaud à Versailles dont la sauvegarde passe par sa réhabilitation dans le cadre d'un grand projet, combinant la création de logements de qualité, des surfaces de bureaux et des activités tertiaires, le développement de commerces et l'accueil d'une crèche. Autre exemple, le bassin de la Ruhr en Allemagne, où d'anciens sites industriels ont été transformés en espaces de rencontres culturelles et en théâtres de la culture et du loisir, comme la mine Zollverein, devenue patrimoine mondial de l'UNESCO, ou en paysages renaturalisés, comme le parc paysager Duisburg Nord.

La reconversion du patrimoine dans le cadre d'une stratégie de dynamisation urbaine peut également contribuer à la régénération de tout un quartier au sein d'une agglomération. Comme l'exemple de Saint-Etienne Métropole qui transforme actuellement le site

LES CORPS DES ARCHITECTES DU PATRIMOINE : UNE LONGUE TRADITION FRANÇAISE

• **Les Architectes en Chef des Monuments historiques (ACMH) sont des architectes spécialisés dans la restauration d'un édifice, d'un monument ou dans la mise en valeur d'un site, classé pour sa valeur historique, archéologique, esthétique et/ou paysagère.**

La commission des monuments historiques a été créée en 1837, avec pour mission la réalisation d'un travail d'inventaire, de classement et d'attribution des crédits. Elle était également chargée de former les architectes qui interviennent sur les monuments historiques dont Eugène Viollet-Le-Duc. En 1907, un décret organise le corps des architectes en chef des monuments historiques : ceux-ci se voient attribuer une circonscription géographique et sont, un temps, secondés par des architectes ordinaires qui assurent l'entretien des monuments et le suivi des chantiers de travaux. La France compte aujourd'hui près de 50 ACMH. Dans le cadre de la rénovation de la profession due à l'harmonisation européenne, le nombre d'ACMH est destiné à monter à 75, à plus ou moins court terme.

Les missions des architectes en chef se sont adaptées à l'extension progressive de la notion de patrimoine et de monument historique à de nouvelles catégories d'immeubles (patrimoine urbain, industriel, maritime, des jardins), à des édifices qui appartiennent à des époques de plus en plus récentes et emploient de nouveaux types de matériaux (constructions en acier, béton armé, verre...).

• **À partir de 1946, le strict entretien des monuments historiques et de leurs abords, est confié aux Architectes des Bâtiments de France (ABF) dont le corps venait d'être créé.**

Les ABF sont des fonctionnaires d'encadrement supérieur appartenant au corps des Architectes et Urbanistes de l'Etat (AUE) ayant opté pour la section « patrimoine ». Ils ont pour missions l'entretien et la conservation des monuments protégés ou non, ainsi qu'un rôle général de conseil gratuit et indépendant sur les autres édifices du patrimoine.

de ses anciennes aciéries de Saint-Chamond pour la construction d'un éco-quartier ainsi qu'une zone d'activités économiques et de loisirs.

Quels sont les moyens pour sauvegarder et valoriser le patrimoine régional ?

Dans le domaine de la conservation du patrimoine, la France bénéficie

d'une longue tradition qui a servi de modèle pour de nombreux pays. Cette tradition s'appuie sur des corps d'architectes de très haut niveau, comme les Architectes en Chef des Monuments historiques (ACMH), et les Architectes des Bâtiments de France (ABF) spécialisés dans la conservation et la restauration architecturales, urbaines et paysagères. Les ACMH et

les ABF sont formés à la prestigieuse École de Chaillot à Paris, devenue le Département Formation de la Cité de l'Architecture et du Patrimoine en 2004. Fidèle à sa mission d'origine, elle délivre des formations post-diplômes sur un domaine qui s'étend des monuments et centres historiques jusqu'au patrimoine ordinaire. L'École de Chaillot mène des coopérations de même nature à l'international. Y sont organisées actuellement des missions pour apprendre aux Chinois comment préserver les vestiges de leur patrimoine historique.

Toutes ces structures ont protégé le patrimoine pendant la période de la reconstruction frénétique de l'après-guerre, où la préoccupation première était de construire des logements rapidement, au détriment de la sauvegarde du patrimoine.

Autres acteurs majeurs dans la sauvegarde du patrimoine : les associations. La Fédération Patrimoine-Environnement regroupe 3 500 associations de protection et de mise en valeur du patrimoine et des paysages, parmi lesquelles figurent des associations nationales comme La Demeure Historique pour les monuments exceptionnels, Vieilles Maisons Françaises, Rempart (protection et restauration de monuments patrimoniaux), Maisons Paysannes... Toutes ces associations ont chacune un rôle spécifique avec des antennes locales pour plus d'efficacité sur le plan régional.

Parmi ces associations, la Fondation du Patrimoine est incontestablement l'organisme qui a la plus grande puissance d'intervention puisqu'elle bénéficie d'avantages fiscaux, et également de dotations budgétaires. Sa principale raison d'être est la sauvegarde et la valorisation du patrimoine rural non protégé. Maisons, églises, ponts, lavoirs, moulins, patri-



6



7

moine industriel, mobilier, naturel... tous les types de patrimoine de proximité sont éligibles à l'action de la Fondation. Aux côtés de l'État et des principaux acteurs du secteur, elle aide les propriétaires publics et associatifs à financer leurs projets, permet aux propriétaires privés de défiscaliser tout ou partie de leurs travaux, et mobilise le mécénat d'entreprise.

Aujourd'hui, je pense que tous les moyens sont complémentaires. Il faut un État très présent car il a un rôle majeur pour la neutralité décisionnelle. Il est en effet difficile de demander à un Conseil régional d'être totalement neutre politiquement sur ces sujets-là. Pour autant, les collectivités locales jouent un rôle important. L'entretien des cathédrales relève de la compétence de l'État, alors que celui des églises relève de la compétence des villes depuis la loi de 1905, imposant la séparation des Églises et de l'État, et interdisant à l'État de reconnaître ou de financer la moindre religion. Les collectivités locales ont également un rôle majeur dans la sauvegarde de ces monuments, notamment depuis la loi de décentralisation de 2004. Mais il y a un petit danger : État et collectivités locales ont tendance à se concentrer sur les fleurons du « grand patrimoine » au détriment du « petit patrimoine de proximité ». C'est pour ce dernier que le rôle de la Fondation du Patrimoine et des autres associations est très important.

Le patrimoine peut-il être un vecteur de citoyenneté et de cohésion sociale ?

Le patrimoine de la France est extrêmement riche, et il reste accessible au plus grand nombre. C'est un vecteur d'identité nationale car il contribue

« CONCILIER LA CONSERVATION, LA MISE EN VALEUR ET L'ADAPTATION DU PATRIMOINE BÂTI AUX EXIGENCES DE LA VIE MODERNE, DANS UN SOUCI DE GESTION OPTIMISÉE DES FONDS PUBLICS ET D'EXPRESSION CONTEMPORAINE »

6- La Pépinière d'entreprises (avant).

7- La Pépinière d'entreprises (après).

8- Projet du gymnase Richard Mique.

à la transmission aux générations futures du riche legs culturel de celles qui nous ont précédés. Il permet aux citoyens de ne pas se couper de leurs racines et leur assurer des repères solides dans un monde qui évolue de plus en plus vite... Le patrimoine est de ce fait un moyen de cohésion sociale, et contribue à la citoyenneté et à la fierté d'appartenance nationale. De plus, la sauvegarde de ce patrimoine permet d'assurer la transmission des savoir-faire et des techniques traditionnelles afférentes au bâti ancien (taille de pierre, torchis, lauze, etc.), ainsi que la mise en œuvre de nombreuses formations pour les jeunes aux métiers « classiques » de la conservation, de la gestion et de l'animation. En fait, c'est l'ensemble des activités directement ou indirectement liées à la filière patrimoine qui est concerné : les métiers de l'aménagement du territoire, du tourisme, de la restauration, de la communication... Tous ces métiers sont porteurs d'avenir.

En conséquence, la mesure et la prise en compte de l'impact économique et social du patrimoine sur un territoire représentent un enjeu déterminant pour les acteurs (État, collectivités, gestionnaires, entreprises) qui interviennent dans sa préservation, sa rénovation et sa valorisation.

Le patrimoine historique de Versailles est mondialement célèbre. Comment conciliez-vous la préservation de ce patrimoine et le développement urbain de la ville ?

Depuis mon élection en 2008, je me suis attaché à concilier la conservation, la mise en valeur et l'adaptation du patrimoine bâti aux exigences de la vie moderne, dans un souci de

gestion optimisée des fonds publics et d'expression contemporaine.

La conciliation de ces deux axes de gestion de la ville, en apparence contradictoires, repose essentiellement sur une stratégie urbaine structurée, dans l'objectif de valoriser la richesse du patrimoine architectural et naturel séculaire de Versailles, et de créer de nouvelles respirations dans la ville. Tous les projets d'urbanisme sont conçus en cohérence avec le patrimoine historique et visent à améliorer la qualité des bâtiments, mais aussi et surtout la qualité de vie de nos concitoyens. Pour ces projets, nous puisons régulièrement dans le vivier des Najap (les jeunes talents architectes et paysagistes) en les incitant à participer à nos concours. Aujourd'hui, Versailles compte huit grands quartiers assez hétérogènes. Notre objectif est de perpétuer le dynamisme économique et l'art de vivre versaillais au sein de ces quartiers, tout en améliorant la porosité et la fluidité du tissu urbain, avec l'ouverture de passages publics à l'intérieur des îlots, la valorisation du patrimoine naturel et la création de nouveaux espaces verts.

L'un de mes plus gros combats pour la Ville a été de transformer le projet de la gare des Chantiers, afin de préserver ce quartier et de sauvegarder le Bassin Carré (XVII^e siècle) qui alimente le château de Versailles.

Autres grands projets emblématiques, la Cour des senteurs repensée pour former un espace de commerce et d'accueil, avec un passage vers le jardin des Récollets ; la Caserne Vauban sera réhabilitée pour accueillir 77 logements étudiants ; la Pépinière d'entreprises constituera un pôle de compétences pour le développement économique local... □



DUBOCQ S.A.

DES HOMMES ET DES TECHNIQUES AU SERVICE DU PATRIMOINE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

LE CHÂTEAU DE VERSAILLES, L'ÉCOLE MILITAIRE À PARIS, L'ÉGLISE DE BRIE- COMTE-ROBERT ET LE CHÂTEAU DE FONTAINEBLEAU EN SEINE-ET-MARNE, LE CHÂTEAU DE CHAMARANDE ET LE DOMAINE DE MÉRÉVILLE DANS L'ESSONNE, LE CHÂTEAU DE GIEN DANS LE LOIRET, TELS SONT QUELQUES UNS DES CHANTIERS SUR LESQUELS L'ENTREPRISE DUBOCQ EST INTERVENUE OU S'EMPLOIE ACTUELLEMENT. DES RÉFÉRENCES QUI PERMETTENT DE SITUER L'UN DE SES DOMAINES PRIVILÉGIÉS D'INTERVENTION : LA RESTAURATION DE MONUMENTS HISTORIQUES. UNE PART IMPORTANTE DE SON ACTIVITÉ EN TANT QU'ENTREPRISE GÉNÉRALE CONCERNE ÉGALEMENT DES CHANTIERS DE CONSTRUCTION NEUVE.

UNE PME FAMILIALE

L'entreprise Dubocq S.A. a été créée en 1866 par René Dubocq, puis transmise de génération en génération au fil des années jusqu'à ce que Jean-Louis Dubocq en devienne le p-d.g. en 1985, à la suite du décès brutal de son père Henri. C'est à partir de cette date que l'entreprise s'est lancée dans les travaux de restauration du patrimoine architectural historique, ce qui n'était pas le cas précédemment. L'explication en est simple : Jean-Louis Dubocq était lui-même à cette époque conducteur de travaux dans une entreprise de restauration de monuments historiques dans les Yvelines. Lorsqu'il a rejoint l'entreprise, il a poursuivi l'activité d'origine de Dubocq dans le secteur du bâtiment mais l'a très rapidement élargie, dès 1987, à la restauration de monuments historiques, ce qui a contribué rapidement à son développement et à sa reconnaissance sur la place de Paris. Aujourd'hui, elle est l'une des dix entreprises spécialisées dans ce type d'activités requérant une qualification et des compétences élevées.

Dubocq S.A. emploie aujourd'hui plus d'une centaine de personnes et exerce 40 % de son activité dans les travaux de rénovation de bâtiments anciens et de



restauration de monuments historiques, et 60 % en tant qu'entreprise générale en construction neuve.

Elle est restée une entreprise familiale puisque Jean-Louis Dubocq est assisté à sa tête par son fils Mickaël et son frère Philippe, précédemment directeur de travaux chez Sicra, et plus spécialement responsable aujourd'hui des chantiers de construction neuve.

Dubocq S.A. bénéficie des qualifications Qualibat 2112, 2183 et 2194, cette dernière s'appliquant précisément à la restauration des monuments historiques.

2- De gauche à droite :

Philippe Dubocq, ingénieur bâtiment, coordination et études -

Jean-Louis Dubocq, président-directeur général -

Mickaël Dubocq, directeur technique.

L'ENSEMBLE DE L'ÎLE-DE-FRANCE

Son secteur d'activité concerne essentiellement l'ensemble de la région Île-de-France et tout particulièrement l'Essonne, département dans lequel elle dispose de son siège social et de bureaux à Saint-Vrain, ainsi que d'un entrepôt et d'un atelier de taille de pierre de 1 000 m², à Marolles-en-Hurepoix.

L'examen des références récentes ou en cours de l'entreprise met bien en évidence la diversité et l'ampleur de ses interventions dans le domaine de la restauration.

Au château de Versailles, après la rénovation du Temple de l'Amour, la restauration intérieure et extérieure du Grand Commun a représenté une opération de 5 millions d'euros tandis que, dans le cadre d'un mécénat de compétences, Dubocq S.A. vient d'achever la restauration des Bains d'Apollon dans le parc du château, pour un montant de 120 000 euros.

DES RÉFÉRENCES PHARES

Toujours à Versailles, l'entreprise vient d'entamer la restauration du rocher et du belvédère du Petit Trianon.

Tous ces travaux sont exécutés en pierre de taille provenant principalement ▾

de Saint-Maximin dans l'Oise et, ponctuellement, de Saint-Pierre-Aigle dans l'Aisne.

L'un de ses chantiers en cours les plus importants concerne la restauration complète des façades du bâtiment dit « 0038 » et de l'entrée de l'École Militaire, avenue de Suffren à Paris, pour un montant de 2,6 millions d'euros. L'activité de restauration ne se limite pas aux façades. Elle concerne également des travaux intérieurs d'aménagement.

À Gien, par exemple, ils concernent la restauration de l'ensemble des

façades et comportent des interventions intérieures sur plusieurs types de matériaux : pierre de taille, briques et enduits.

DES TECHNIQUES DE CONSERVATION « HISTORIQUES »

Pour les travaux intérieurs et extérieurs, l'entreprise s'est également fait une spécialité de la réalisation des enduits à l'ancienne, dits « parisiens », en plâtre et chaux.

Un bon exemple en est donné actuellement par le chantier de la Maison des

3- La façade restaurée du Grand Commun à Versailles (78).

4- Travaux intérieurs dans le Grand Commun à Versailles (78).

5- Le Temple de l'Amour dans le parc du Château de Versailles (78).

6- Église de Grange-le-Roi (91).

7- Travaux sur les piliers et les voûtes dans l'église de Congerville (91).

Fontainiers, non loin du château de Versailles, où elle réalise des enduits en plâtre et chaux avec des badigeons, ainsi que de fausses briques en façade, à l'identique de ce qui avait été réalisé lors de l'édification du bâtiment au XVIII^e siècle.

Les pierres utilisées pour les divers chantiers de restauration sont débitées et taillées dans l'atelier de Marolles où quatre compagnons sont affectés en permanence.

Sur site, une très grande importance est accordée au respect intégral de l'existant, tant dans l'esprit que dans la



3



5



6



4



7



© DUBOCQ

forme. D'où l'importance d'un recrutement de maçons, de tailleurs de pierre, de compagnons déjà bien expérimentés ou formés au sein de l'entreprise sur une période de 5 à 10 ans.

« Cette formation interne revêt une grande importance, précise Jean-Louis Dubocq. Pour restaurer des monuments historiques, il faut que nos compagnons acquièrent une "sensibilité" propre à ce type d'activité, indispensable pour découvrir et s'approprier sur les chantiers les techniques mises en œuvre par le passé, de façon à les restituer le plus fidèlement possible. Ceci ne peut s'obtenir qu'après de longues années de pratique ».

Le recrutement des tailleurs de pierre s'effectue de la même façon, auprès des écoles de formation spécialisées –notamment l'école de Saint-Lambert à Paris, ou par le suivi de stage.

UNE DUALITÉ DE COMPÉTENCES

Au niveau de la passation des contrats, l'activité restauration relève à près de 90 % de marchés publics sur appel d'offres, où Dubocq S.A. se trouve ainsi en concurrence avec d'autres entreprises.

La situation est doublement différente pour les marchés en entreprise générale où elle intervient à 90 % dans l'Essonne : la provenance des offres est plus diversifiée puisqu'elle peut concerner aussi bien la construction de collèges et de centres culturels que de bâtiments industriels et sportifs, tandis que le matériau mis en œuvre est essentiellement le béton et non plus,

8 & 9- Tailleur de pierre et découpe de pierre dans l'atelier de Marolles-en-Hurepoix (91).

10- Le stock de pierres de taille de Marolles-en-Hurepoix (91).

11- L'échafaudage du chantier de l'École Militaire à Paris.

sauf exception, la pierre de taille calcaire. Parmi les réalisations récentes remarquables, on peut citer le centre Gérard Philippe à Sainte-Geneviève-des-Bois et une école à Grigny dans l'Essonne. Cette dualité de compétences et d'activités est nécessaire au bon développement de Dubocq S.A. car, même en Île-de-France où les bâtiments anciens sont nombreux, la restauration de monuments historiques ne peut assurer à elle seule la croissance, voire la pérennité d'une entreprise familiale, bien que la redécouverte de l'importance du patrimoine historique soit incontestablement l'un des grands faits de notre société dans laquelle chacun cherche les racines de son identité et de sa vie.

« Restaurer, rénover, réhabiliter les monuments qui sont le témoignage de cette histoire commune est aujourd'hui l'une des tâches les plus exaltantes proposées aux entreprises du BTP amoureuses de leur métier, commente Jean-Louis Dubocq. Elles savent à la fois retrouver le geste ancestral du tailleur de pierre et l'accompagner des techniques les plus modernes. L'entreprise Dubocq est de celles-là ». □

DES CHEFS-D'ŒUVRE DU PATRIMOINE RÉNOVÉS

De nombreuses références mettent en lumière la diversité de compétences de Dubocq S.A. dans la rénovation, la restauration et la réhabilitation du patrimoine architectural historique :

- Grand Commun du château de Versailles (78) ;
- Rocher et belvédère du Petit Trianon (78) ;
- Maison des Fontainiers à Versailles (78) ;
- Église de Monthéry (91) ;
- Château de Cély-en-Bière (77) ;
- Hôtel particulier rue Las Cases à Paris 7^e ;
- Château de Méréville (91) ;
- Château de Gien (45) ;
- École Militaire à Paris.



SE FORMER AUX MÉTIERS D'ART À COUBERTIN

REPORTAGE DE MONIQUE TRANCART

À LA FONDATION DE COUBERTIN, DES JEUNES EXERÇANT DES MÉTIERS D'ART APPROFONDISSENT LEURS CONNAISSANCES CULTURELLES ET LEUR SAVOIR-FAIRE MANUEL.





1 © FONDATION DE COUBERTIN

1- Le hameau du domaine de Coubertin, lieu de séjour des pensionnaires pendant leur année de perfectionnement.

2- Bertrand Doussault, tailleur de pierre :
« Les chantiers auxquels nous participons sont plus pointus ici. »

3- Le cadre remarquable du château et de ses abords inspire la réflexion et le goût du travail bien fait aux jeunes qui viennent s'y former à des métiers manuels artistiques.

Chaque année, une trentaine de jeunes se forment au domaine de Coubertin, à Saint-Rémy-les-Chevreuse (Yvelines). Leurs spécialités : taille de pierre, métallerie-ferronnerie, menuiserie-ébénisterie, fonderie d'art. Pendant onze mois, ils partagent leur temps entre cours théoriques et travail en atelier avec des professionnels. Moyenne d'âge en 2010-2011 : 23 ans. L'année dernière, deux jeunes femmes ont été admises en menuiserie. L'année prochaine, une Américaine vient se spécialiser en taille de pierre.

Venant d'horizons divers, les pensionnaires de Coubertin appelés aussi « boursiers », viennent compléter leur savoir et prendre part à des réalisations d'artisanat d'art souvent hors du commun. « *Les chantiers auxquels nous participons sont plus intéressants et plus pointus qu'ailleurs,* » témoigne

Bertrand Doussault, tailleur de pierre, 25 ans, boursier cette année. Il est venu ici pour s'ouvrir et acquérir des connaissances - histoire de l'art, dessin, géométrie descriptive, etc. - après un CAP, une école de sculpture en Italie et son travail de réception de compagnon présenté en 2010. Cédric Suire, quant à lui, a participé à la rénovation de la structure en fer des vitraux de la Sainte-Chapelle à Paris alors qu'il était pensionnaire en 2009-2010. Métallier, 27 ans, il revient à la fondation suivre une formation de maître de stage. L'année dernière, il avait beaucoup apprécié « *d'avoir le temps de se former, au calme, d'assister à des conférences sur place, de s'ouvrir aux arts, à l'histoire des métiers, à tout ce qui donne une compréhension plus large de sa spécialité.* » Il travaille actuellement dans une entreprise de métallerie à Florence (Italie) et allie emploi et étude des arts.

La Fondation de Coubertin est une véritable entreprise. Elle emploie 110 personnes, en majorité des professionnels de l'artisanat d'art, sans compter les boursiers, eux aussi salariés. Dans l'atelier des métaux non ferreux, des portes à structure inox et habillage en bronze et laiton, sont en cours de réalisation. Plus loin, une sculpture de Paul Griot, l'anneau de Möbius, dont la structure a succombé à la rouille, va être rénovée. À l'atelier menuiserie, des bancs circulaires sont prêts à partir au Palais Garnier à Paris. Plus loin, se construisent lambris et boiseries d'un hôtel particulier. À la fonderie, trône le troisième exemplaire de la statue du Général De Gaulle de Jean Cardot destiné à la ville de Nice.

OMNIPRÉSENCE DE L'ART

Parmi les réalisations récentes de la Fondation de Coubertin, citons les nouvelles grilles royales du château de Versailles, l'archange Saint-Michel de Fremiet (cuivre martelé et doré) au Mont-Saint-Michel, la Porte de l'enfer en bronze de Rodin, etc. et quantité d'escaliers en toute matière : pierre, acajou lamellé collé et marches en verre, etc. Le domaine regorge d'équipements originaux fabriqués sur place - barrières, portes - et son parc abrite quantité de statues et sculptures d'artistes. Un jardin est dédié aux bronzes. La fondation, reconnue d'utilité publique, dispose de ressources qui proviennent de la production de ses ateliers. □



© FONDATION DE COUBERTIN

3

TRANSMETTRE LE SOUCI DE LA PERFECTION

Situé en pleine campagne à Saint-Rémy-les-Chevreuse (Yvelines), le domaine de Coubertin couvre 29 hectares. Il abrite un château (bibliothèque, collections, musée) et un hameau (salles de cours, hôtellerie), tous deux du XVII^e siècle, et des bâtiments modernes dotés des dernières machines industrielles : les Ateliers Saint-Jacques (menuiserie-ébénisterie, métallerie-ferronnerie, taille de pierre), et la fonderie d'art.

Le domaine appartenait à la famille de Coubertin depuis 1577 et fut transformé en fondation en 1973. Les deux fondateurs, Yvonne de Coubertin, héritière du site, et Jean Bernard, sculpteur qui crée l'Association des Compagnons du devoir, la considèrent comme « une université ouvrière, un point de rencontre entre différents milieux, un lieu où l'être humain retrouve son unité. »

« Tout a été fait pour protéger les boursiers des nuisances de la vie moderne : pas de bruit, ni de transports fatigants, pas de temps perdu ni d'obstacles à une réflexion personnelle, est-il rappelé dans la brochure de la fondation. La fondation accueille chaque année, en qualité de pensionnaires, des jeunes gens exerçant un métier manuel, ayant déjà fait leur apprentissage, et méritant par leurs dispositions et leurs qualités d'être aidés par elle. (...) Elle unit tous ceux qui s'attachent à transmettre le souci de la perfection et de la qualité du travail bien fait. »

DIAGNOSTIC ET RÉHABILITATION D'UN OUVRAGE SENSIBLE SUR LE PIPELINE SUD-EUROPÉEN

AUTEURS : PATRICK SUFFREN, SPSE - FRANÇOIS MARTIN ET ALEXANDRE MAZZOCCO, LERM -
CHRISTOPHE RAULET ET CHRISTOPHE CHANONIER, DIADÈS - JACQUES RESPLENDINO, SETEC TPI

LE PIPELINE SUD-EUROPÉEN, VEINE ÉNERGÉTIQUE DE L'EUROPE CONSTRUITE À LA FIN DES ANNÉES 1950, ASSURE L'APPROVISIONNEMENT DES RAFFINERIES ET D'UNE PLATE-FORME PÉTROCHIMIQUE SUR L'AXE FOS-LYON-KARLSRUHE (769 KM). DANS SA PARTIE AÉRIENNE, IL EST SOUTENU PAR UN OUVRAGE EN BÉTON PRÉCONTRAIT TRAVERSANT LE LIT MAJEUR DE LA DURANCE (DÉPARTEMENT DES BOUCHES-DU-RHÔNE). CET OUVRAGE FAIT ACTUELLEMENT L'OBJET D'UNE RÉHABILITATION ET D'UN RENFORCEMENT SISMIQUE. EN AMONT DES TECHNIQUES QUI SERONT APPLIQUÉES PROCHAINEMENT SUR CE CHANTIER SENSIBLE, CET ARTICLE PRÉSENTE LE DIAGNOSTIC ET LE PROJET DE RENFORCEMENT DE L'OUVRAGE.



30 % DU TRANSPORT DE PÉTROLE EN EUROPE

La Société du Pipeline sud-européen (SPSE) assure l'approvisionnement des raffineries d'une plate-forme pétrochimique sur l'axe Fos-Lyon-Karlsruhe (769 km) réparties sur trois pays (France, Suisse et Allemagne).

Le transport actuel, de l'ordre de 23 millions de tonnes par an, représente plus de 30 % du transport de pétrole brut par pipeline en Europe (en tonnes.kilomètres). D'autres pipelines complètent le réseau européen, qui est en mesure d'approvisionner, à partir de la Méditerranée, de la Manche et

**1- Vue des
premières
travées
du Pipeline
sud-européen.**

**1- View
of the first
spans.**

de la Mer du Nord, l'ensemble des raffineries situées au cœur de l'Europe occidentale.

Suite à l'accident survenu le 7 août 2009 dans la plaine de la Crau, SPSE a décidé de comparer l'état actuel, et son évolution prévisible, des deux pipelines susceptibles d'approvisionner les

raffineries de l'est de la France et de l'ouest de l'Allemagne. Pour cela, un programme d'inspection a été réalisé sur le pipeline de 40 pouces, en exploitation minimale. Une remise en état des équipements du pipeline de 34 pouces a été lancée en même temps, afin de pouvoir l'exploiter de nouveau et de l'inspecter par racleurs instrumentés internes.

Dans le cadre de cette remise en état, la question du passage aérien de la Durance s'est posée très rapidement. En effet, par application de l'article 9.1 de l'arrêté du 4 août 2006 réglementant la sécurité des pipelines, l'accord de l'administration est nécessaire pour maintenir l'ouvrage aérien.

SPSE a donc demandé au Lerm et à Diadès, en avril 2010, d'étudier et d'évaluer la conformité de l'ouvrage du point de vue de la tenue statique et de la tenue au séisme. Les investigations (structure, matériaux et géotechnique), le recalcul statique et dynamique, l'instrumentation, le diagnostic et les deux AVP de renforcement statique et dynamique ont conduit à un projet de renforcement et de réhabilitation validé par la Dreal. Ces études ont été réalisées dans des délais très serrés, liés à l'urgence du redémarrage de la conduite, pour aboutir au DCE et permettre la consultation d'entreprises spécialisées actuellement en cours.

FRANCHISSEMENT DE LA DURANCE

L'ouvrage étudié, situé sur le territoire de la commune de Noves (13), est une structure aérienne en béton précontraint qui franchit le lit majeur de la Durance sur une longueur de 284 m. Il se compose d'une travée de 12 m et de huit travées de 34 m, nommées P0 à P8. L'ouvrage est constitué d'un pont



bâche en U, dont la sous-face a été réalisée, en 1962, 20 cm au-dessus du niveau des plus hautes eaux de la Durance. La section mesure 1,85 m de haut pour une largeur extérieure de 1,70 m. En outre, le pont bâche est recouvert de dalettes en béton armé qui protègent la canalisation des agressions extérieures. D'après les plans d'ouvrage, la section transversale est en forme de U. L'ouvrage est précontraint longitudinalement par post-tension par des câbles disposés dans les âmes du U (figure 3).

Le diagnostic a démarré par la définition du programme d'investigations qui a été mis au point par Diadès, chargé de concevoir et de maîtriser les réparations et le renforcement de l'ouvrage.

En fonction des désordres constatés et du contenu du dossier d'ouvrage, des investigations complémentaires ont été réalisées (investigations sur les matériaux, mesure des tensions résiduelles), afin de définir les hypothèses

nécessaires pour le recalcul statique et dynamique de l'ouvrage, et la nature des travaux de réhabilitation à mettre en œuvre.

DÉSORDRES AFFECTANT L'OUVRAGE

Le diagnostic réalisé par le Lerm a permis de mettre en évidence, d'un point de vue visuel, un bon état général de l'ouvrage. Les désordres observés sont tout de même assez nombreux, mais d'intensité mineure à moyenne.

Ils correspondent principalement à :

→ Des fissures verticales et obliques sur les faces latérales au niveau des appuis ;

→ Des fissures horizontales à la jonction entre les faces latérales et la dalle inférieure ;

→ Des épaufrures sur la plupart des éléments de la structure.

La plupart des zones d'appui et des abouts de poutre (interface entre les piles et les travées) présente un état de dégradation avancée : fissures, épaufrures avec aciers corrodés apparents et éclats du béton (photo 4).

Dans le cadre de l'instrumentation, les cartographies de désordres établies par Diadès ont permis de définir précisément les travaux d'entretien spécialisé à intégrer au projet de réhabilitation. Dans un souci de durabilité de la réhabilitation de l'ouvrage, il fallait également caractériser en profondeur les désordres affectant les matériaux constitutifs de la structure, afin de définir les hypothèses de calcul et les bases de la réparation. Huit zones ont ainsi été investiguées pour procéder à des prélèvements de carottes analysées en laboratoire, combinés à une série d'essais non destructifs *in situ* définissant un échantillonnage représentatif de l'état général de l'ouvrage (figure 5). ▷

2- Partie aérienne du Pipeline sud-européen traversant la Durance sur la commune de Noves (13).

3- Caractéristiques techniques de l'ouvrage diagnostiqué.

4- Quelques désordres extérieurs.

2- Above-ground part of the South European pipeline crossing the Durance in the district of Noves.

3- Technical characteristics of the diagnosed structure.

4- Some external damage.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE L'OUVRAGE DIAGNOSTIQUÉ

Type de structure	Pont Bâche en U isostatique précontraint
Longueur totale de l'ouvrage	284 m
Nombre de travées	8 travées isostatiques
Portée des travées	8 x 34,0 m + 12,0 m
Largeur utile entre les âmes	1,30 m
Largeur totale	1,70 m
Épaisseur de l'âme	0,20 m
Hauteur utile	1,60 m
Hauteur totale	1,85 m
Épaisseur de la dalle	0,20 m
Type de fondations	Chaque travée est fondée : - d'un côté par un appui simple (1 seule ligne de pieux) - de l'autre côté par un appui double (2 lignes de pieux)
Type de précontrainte	Armatures GTM type CO2

Tableau 1 : Caractéristiques générales de l'ouvrage

3



4

INVESTIGATIONS SUR LES ÉLÉMENTS EN BÉTON ARMÉ

Les mesures ont été réalisées à l'aide de potentiels d'électrodes, car la corrosion des aciers dans le béton s'accompagne de phénomènes électrochimiques comparables à ceux des piles électriques (métaux en présence d'un électrolyte) et crée ainsi des différences électriques. Ces distinctions, mesurables en millivolts (mV), sont représentées par des cartes de potentiels (figure 6). Afin de caractériser précisément les phénomènes de corrosion des armatures dans le béton sur chaque élément de l'ouvrage, les mesures de potentiels d'électrode sont croisées avec :

→ Les mesures de profondeur de carbonatation du béton (détermination du pH par aspersion d'une solution de phénolphthaléine sur des fractures fraîches de béton, préalablement obtenues par un essai de fendage) ;

→ Les mesures de teneur en chlorures déterminées en laboratoire par potentiométrie ;

→ Les mesures de l'enrobage des aciers par auscultation radar, une méthode légère et non destructive permettant de réaliser une investigation précise et en continu de la plupart des matériaux, à des profondeurs variant de quelques centimètres à plusieurs mètres.

Au final, il apparaît que la partie aérienne (travées) de l'ouvrage présente un état de conservation globalement correct au regard de son âge (près de 60 ans), une activité de corrosion peu marquée et une absence de chlorure. L'étude montre que des infiltrations, en relation avec la présence d'eau stagnante dans la structure en U de l'ouvrage, ont favorisé le développement d'un phénomène de corrosion mis en évidence principalement à la jonction dalle-face latérale, ainsi qu'au niveau des bossages d'appui.

INVESTIGATIONS SUR LES ÉLÉMENTS EN BÉTON PRÉCONTRAINT

Seules les amorcés des tracés des câbles au niveau des ancrages étaient disponibles sur les plans d'exécution. Le diagnostic des gaines et armatures démarrait par la localisation précise des éléments métalliques à l'intérieur des travées en béton. Le radar géophysique développé par le département recherche et innovation du Lerm fournit les coupes-profondeurs des matériaux auscultés. Elles mettent en évidence les différentes couches constitutives, la position du ferrailage et les éventuelles anomalies correspondant notamment à des vides ou à des matériaux hétérogènes. Le positionnement précis des gaines est tracé directement sur

la travée à l'aide d'un code couleur (photo 7). Cette technique apporte une précision chirurgicale lors de l'ouverture de la fenêtre pour accéder à la gaine. L'essai de tension à l'arbalète (photo 8) permet d'estimer la tension résiduelle dans une armature de précontrainte, fil ou toron. En détail, les principaux points suivants sont notés sur les câbles de précontrainte de type C.O2 75t :

→ État de la gaine au moment de l'ouverture de la fenêtre ;

→ Qualité de l'injection du coulis au moment de l'ouverture de la gaine ;

→ État des fils de précontrainte visibles avant ou après dégagement du coulis, un prélèvement de ce dernier étant systématiquement effectué à d'éventuelles fins d'analyse. Dans le cas où des vides sont mis en évidence au moment de l'ouverture de la gaine, une vidéo-endoscopie est réalisée (vidéo-endoscope muni d'un objectif vidéo haute définition de 4 mm de diamètre).

Les essais pratiqués ont mis en lumière un écart notable entre la tension mesurée et la tension théorique définie dans les notes de calcul de l'époque. Compte tenu de ces résultats, la capacité portante résiduelle du tablier devait être appréciée par un recalcul sur la base des tensions mesurées. Cet écart entre la tension résiduelle et la tension théorique s'explique notamment par la mauvaise compréhension, à l'époque, des phénomènes de fluage du béton et de relaxation des câbles, et par la non-prise en compte du phasage (circulaire n° 141 de 1953).

Pour compléter la définition des hypothèses sur la résistance de l'ouvrage, des essais de résistance à la compression des bétons prélevés sur les piles et semelles ont été menés en laboratoire selon la norme NF EN 12504-1, sur des éprouvettes exemptes d'armatures. Les bétons étudiés présentent une résistance mécanique moyenne de 28,7 Mpa (photos 9 et 10).

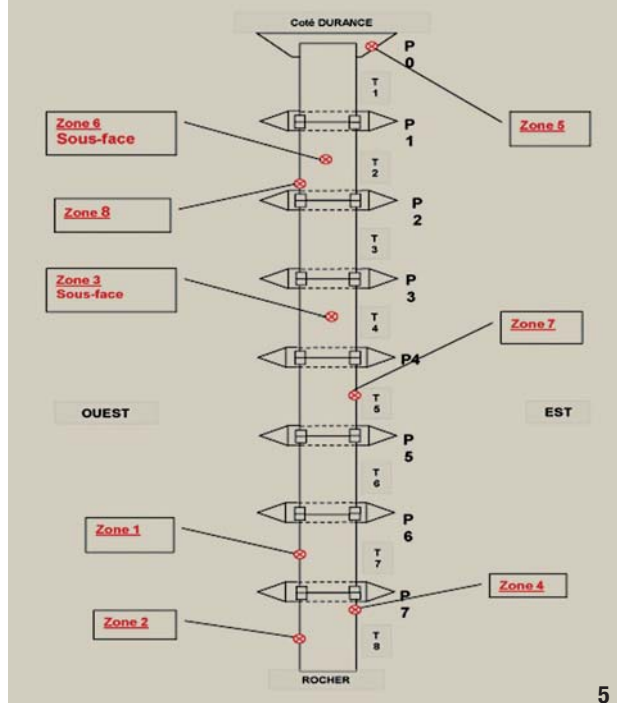
5- Localisation des zones de mesures non destructives et prélèvements.

6- Exemple de relevé de corrosion en sous-face d'une travée.

5- Location of areas for non-destructive measuring and sampling.

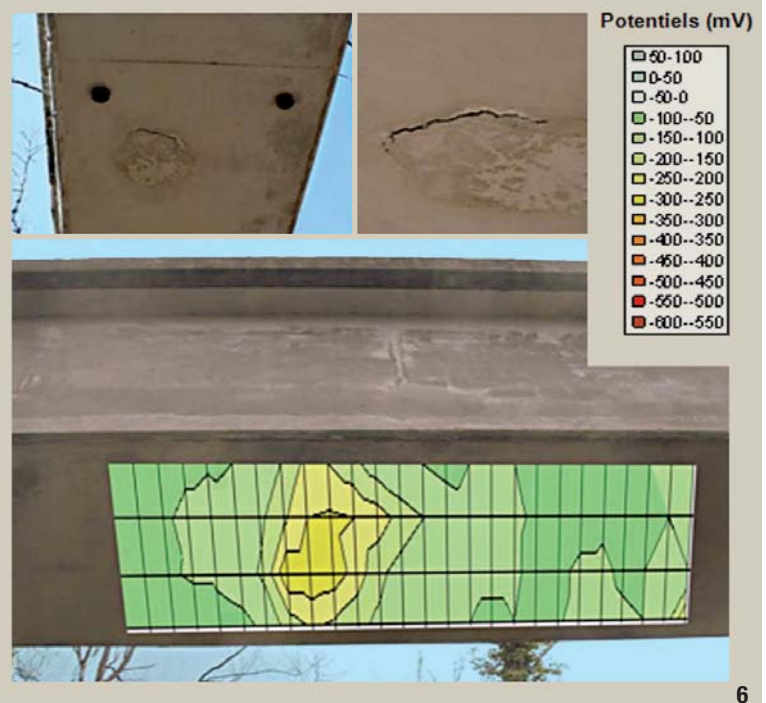
6- Example of a corrosion reading on the underside of a span.

LOCALISATION DES ZONES DE MESURES NON DESTRUCTIVES ET PRÉLÈVEMENTS



5

EXEMPLE DE RELEVÉ DE CORROSION EN SOUS-FACE D'UNE TRAVÉE



6



INSTRUMENTATION ET SUIVI MENSUEL

L'urgence du redémarrage de la conduite a nécessité une remise en service partielle de l'ouvrage. Celle-ci a été autorisée par la Dreal avant la fin des travaux de confortement sismique, dans la mesure où l'opération devant conduire au renforcement sismique était enclenchée. Afin de garantir l'exploitation partielle en toute sécurité, une instrumentation et un suivi mensuel de la structure pendant la phase transitoire entre le début du redémarrage de la conduite et la fin des travaux de réparation-renforcement ont été assurés. L'instrumentation, basée sur des mesures de jauges, permet au maître d'ouvrage d'exploiter le Pipeline en toute sécurité en suivant l'évolution de la structure. Toutes les évolutions sont relevées et analysées afin de définir d'éventuelles interventions. L'analyse de toutes les mesures permet, par ailleurs, de mieux comprendre le fonctionnement de l'ouvrage. Assurée par Diadès, elle montre que les déformations relevées lors des différentes visites sont normales et essentiellement dues aux phénomènes thermiques cycliques.

CARACTÉRISATION GÉOTECHNIQUE

Des sondages pressiométriques visaient à déterminer les caractéristiques géotechniques de dimensionnement des fondations (effort de pointe, frottement latéral sol-pieux, module de déformation linéaire et frottement négatif).

7- Implantation des aciers et gaines de précontrainte par radar géophysique.

8- Essais de tension à l'arbalète réalisés par le CETE Méditerranée.

9- Essai de résistance à la compression sous presse 3R dans les laboratoires physiques du Lerm.

10- Détermination du ferrailage des pieux.

7- Locating rebars and prestressing ducts by geophysical radar.

8- Crossbow tensile/compression tests performed by the CETE Méditerranée.

9- Compressive strength test under 3R press in the physics laboratories of the Lerm.

10- Specification of pile reinforcing bars.

L'essai au pénétromètre statique, puis les prélèvements d'échantillons pour analyses plus poussées en laboratoire, permettent d'appréhender les couches de sols potentiellement liquéfiables. Plus généralement, la phase de caractérisation géotechnique (réalisation de quatre sondages géologiques de 15 à 25 m de profondeur) a donné des vues rassurantes sur les aspects suivants : nature des différents terrains, caractéristiques mécaniques et géométriques, niveaux de circulation d'eau au moment des sondages, classification sismique du site selon les règles AFPS et/ou l'Eurocode 8, avec estimation des vitesses sismiques secondaires dans les alluvions, déplacement maximal des têtes de pieux lors du séisme selon le PS92, suspicion des sols à la liquéfaction, paramètres géotechniques à prendre en compte pour la vérification des fondations actuelles (photo 11).

Suite à la phase de diagnostic des bétons armés, des bétons précontraints et des sols, l'ensemble des données récoltées a été analysé et intégré par Diadès dans la définition globale du projet.

RECALCUL STATIQUE DE L'OUVRAGE

La précision du diagnostic structurel, notamment pour une vérification de portance de l'ouvrage, tient à la représentativité des hypothèses retenues. En effet, le diagnostic fondé sur des reconnaissances *in situ* et en laboratoire permet d'optimiser les hypothèses

de recalcul : caractéristiques géométriques et intrinsèques des matériaux, détermination de la précontrainte résiduelle diminuant l'incertitude liée aux différentes pertes inhérentes à la précontrainte (fluage du béton et relaxation des câbles). Ainsi, la bonne connaissance de l'ouvrage permet d'adapter certains coefficients réglementaires lors des différentes vérifications.

COUCHES DE SOLS ET RISQUES DE LIQUÉFACTION

Les piles présentent une massivité importante pour assurer la stabilité de l'ouvrage pendant les crues de la Durance (photo 1). Cette caractéristique géométrique, associée à un risque de liquéfaction superficielle du sol sur une profondeur moyenne de 4 m, constitue un aléa important.

Le risque dû à l'augmentation importante de la pression interstitielle a été pris en compte par la non-modélisation du sol identifié comme liquéfiable. Cela était justifié par le fait que la zone liquéfiable était superficielle et n'entraînait donc pas de tassement de sol. De plus, pour tenir compte des aléas des données géotechniques, trois modèles de sol ont été étudiés en parallèle : un sol souple, un sol moyen et un sol rigide.

HYPOTHÈSES DE CALCUL ET MODÉLISATION

Au cours des différentes phases d'étude, plusieurs modèles de calcul ont été réalisés avec le logiciel Pythagore (logiciel aux éléments finis développé et commercialisé par Setec TPI).

Dans un premier temps, l'analyse structurelle a porté sur une seule travée. La principale problématique de ce type d'ouvrage composé de travées isostatiques, sous séisme, est le risque d'entrechoquement et/ou d'échappement d'appui. Pour cette étude, le Pipeline est considéré comme plein de pétrole, ce qui correspond à son fonctionnement normal et quasi permanent. Ainsi, la travée (tablier, piles et fondations) la plus souple a été modélisée pour déterminer l'existence de ces risques. La première vérification montre que le risque d'échappement d'appui est faible, alors que le risque d'entrechoquement entre plusieurs travées est important. Ce risque est accru par le mauvais état des appareils d'appui et des bossages d'appui. Une remise à niveau de l'ouvrage est donc nécessaire sur ce point, ne serait-ce que pour assurer le bon fonctionnement des appuis en cohérence avec le nouveau schéma statique, après renforcement. ▽

Dans un second temps, en phase avant-projet, une modélisation de trois travées a été réalisée pour analyser l'influence des travées adjacentes sur la travée initialement étudiée, en fonction des différentes interventions préconisées et des différences de raideur d'appuis.

Enfin, en phase projet, une modélisation complète de l'ouvrage a été menée afin d'étudier toutes les incidences structurelles des interventions de réparation-renforcement sous charges permanentes, sous charges d'exploitation et sous sollicitations sismiques, et pour affiner le dimensionnement en conséquence (figure 12).

SPECTRES DE RÉPONSE SISMIQUE

Le choix du spectre à appliquer à la structure est fondé sur l'importance de l'ouvrage et sur les enjeux environnementaux du site.

L'ouvrage se situe dans le lit majeur de la Durance, en zone de risque sismique modéré d'après l'annexe des articles R563-1 à R563-8 du code de l'environnement, modifiés par les décrets 2010-1254 et 2010-1255 du 22 octobre 2010, ainsi que par l'arrêté du 22 octobre 2010. L'accélération nominale retenue est de 1,6 m/s², ce qui correspond à la valeur haute de ladite zone. De plus, un coefficient de 1,4 est appliqué au spectre réglementaire pour tenir compte de l'importance sociale et économique de la structure. Ce spectre est ensuite appliqué à la structure par une analyse multimodale qui permet d'identifier et de quantifier l'importante différence de rigidité entre les piles fondées sur deux pieux et les piles fondées sur trois pieux (figure 13), en fonction également du toit du substratum.

11- Sondage pour caractériser la géotechnique des sols.

12- Analyse modale de la structure.

13- Analyse modale illustrant la différence de rigidité entre les piles.

11- Test boring to characterise the soil geotechnics.

12- Modal analysis of the structure.

13- Modal analysis illustrating the difference in rigidity between piers.



11

L'analyse sismique de la structure confirme le risque d'entrechoquement des travées indépendantes, même en intégrant la réfection des bossages d'appui.

En effet, la distance libre entre deux travées est d'environ 4 cm, alors que le déplacement longitudinal maximal d'un tablier, sous séisme, est estimé à environ 6 cm. Le déplacement vertical, sous séisme ascendant et descendant, est d'environ 2,5 cm.

AVANT-PROJET DE RENFORCEMENT POUR TENUE AU SÉISME

L'avant-projet de renforcement de la passerelle a donc été mené en considé-

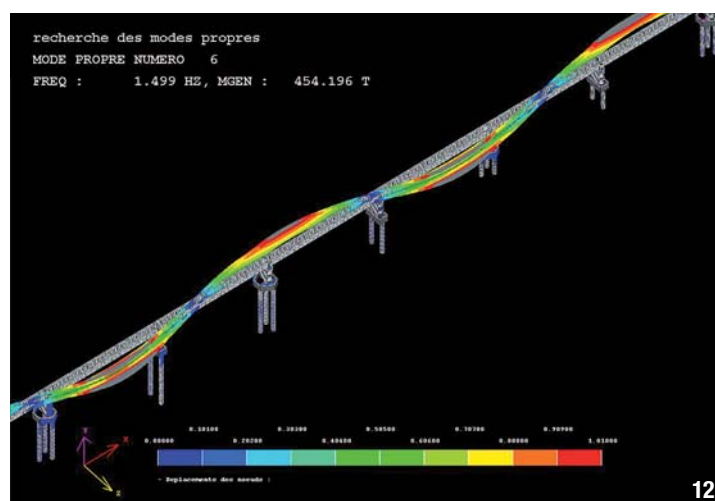
rant un risque généralisé de liquéfaction du sol. La massivité des piles et la non-prise en compte du sol liquéfié nécessitent de faire intervenir la ductilité (plastifications locales) de la structure pour permettre la reprise des sollicitations sismiques et diminuer forfaitairement les sollicitations à reprendre. Ainsi, le coefficient de comportement considéré pour le pré-dimensionnement sismique était de 2,2. La prise en compte de la ductilité de la structure a nécessité le changement du schéma statique et le renforcement local de certaines parties de l'ouvrage. Pour le renforcement des piles par chemisage, l'utilisation de matériaux composites a été préférée à d'autres techniques,

notamment l'utilisation de béton projeté, afin de limiter l'augmentation du poids de la structure, et donc les sollicitations sismiques à reprendre.

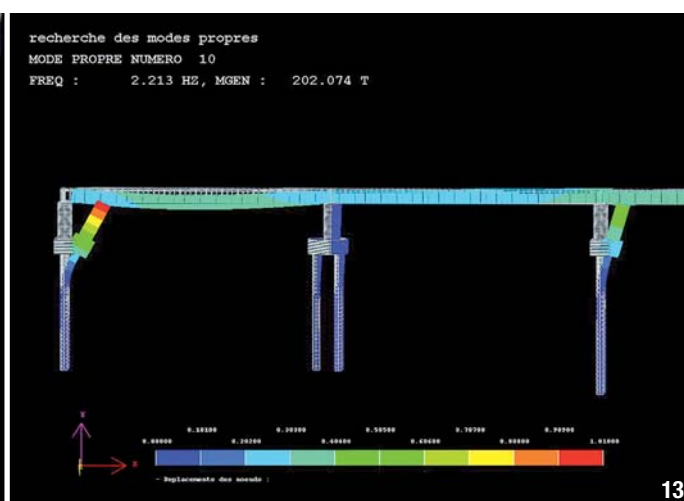
PÉRENNISER LA STRUCTURE

Les interventions d'entretien préconisées pour pérenniser l'ouvrage comprennent le curage de l'intérieur de la structure, la réfection de l'étanchéité et le ragréage des bétons dégradés, ainsi qu'un traitement des fissures en fonction de leur ouverture et de leur profondeur, aussi bien sur le tablier que sur les piles.

Quelques pathologies importantes justifiaient également une intervention de réparation. La forte dégradation des



12



13



bossages et appareils d'appui (photos 14 et 15), créant localement des différences de raideur, justifiant leur réfection afin de redonner un fonctionnement normal à l'ouvrage. Elle est cohérente avec le système de renforcement retenu et le nouveau schéma statique.

L'analyse sismique a montré que le risque d'entrechoquement de la structure existait. Le fait que chaque travée soit appuyée sur une pile souple et sur une pile raide a conduit à atteler les travées entre elles pour permettre la reprise des sollicitations longitudinales et limiter le risque d'entrechoquement. La durabilité de la précontrainte intérieure n'étant pas assurée à 100 %, et l'utilisation de précontrainte additionnelle extérieure étant nécessaire pour améliorer la reprise des sollicitations verticales ascendantes et descendantes sous séisme, nous avons optimisé le tracé de la précontrainte. Nous avons ensuite vérifié les sections en conséquence, en fonction des différents chargements.

14- Appareil d'appui en élastomère à remplacer.

15- Bossage d'appui dégradé.

16- CDS pour étude de surtension dans les câbles existants R2.

14- Elastomer support device to be replaced.

15- Damaged support anchor block.

16- DSC apparatus for studying over-tensioning in existing R2 cables.

RENFORCEMENT STATIQUE ET DYNAMIQUE COMBINÉ

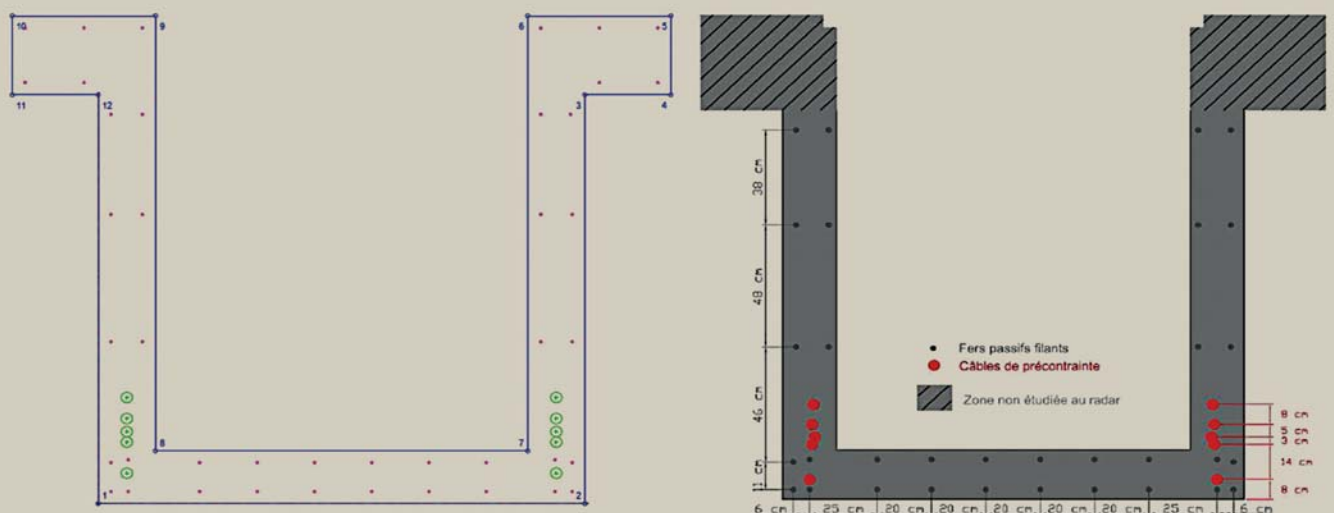
Le renforcement dynamique de la structure a été envisagé dès le départ, dans un souci de durabilité. En effet, il est apparu logique de profiter des renforcements dynamiques pour pérenniser au mieux l'ouvrage. Parmi les techniques analysées, la précontrainte extérieure additionnelle s'est révélée la plus adaptée, car cette solution permet aussi de limiter tout phénomène de surtension dans les câbles sous certains cas de charge. L'étude de surtension des câbles en classe III du BPEL a été réalisée avec le logiciel CDS du Setra. Elle est basée sur le relevé précis de la position des câbles et aciers passifs réalisé par le Lerm (figure 16). Les sections ont ainsi été vérifiées, en statique et en dynamique, pour que la précontrainte assure non seulement l'attelage des travées mais aussi la reprise des efforts sous séisme, et la reprise d'une perte de précontrainte supplémentaire liée à la défaillance éventuelle de quelques câbles.

La solution de renforcement retenue est donc l'attelage de travées. Pour des raisons de dilatation thermique, l'attelage de toutes les travées n'est pas possible. Ainsi, certaines travées sont attelées entre elles et les travées non attelées sont reliées par des dispositifs mécaniques dynamiques annulant le risque d'entrechoquement sous événement sismique. En effet, ces dispositifs permettent les déplacements lents dus aux effets thermiques et bloquent les déplacements dus aux mouvements sismiques. Les attelages utilisent la précontrainte additionnelle extérieure, permettant de les maintenir comprimés sous tous les cas de charges. La précontrainte additionnelle est fixée à la structure via des blochets d'ancrage (figure 17). Au niveau des têtes de piles, des butées sismiques transversales sont installées pour sécuriser l'ouvrage et limiter les déplacements transversaux du tablier. Au niveau des blochets d'ancrage, situés aux abouts de quelques tabliers, un renforcement local en composites collés est disposé pour reprendre les différents efforts d'ancrage et d'entraînement.

MAINTENIR L'ACCESSIBILITÉ DE LA CONDUITE

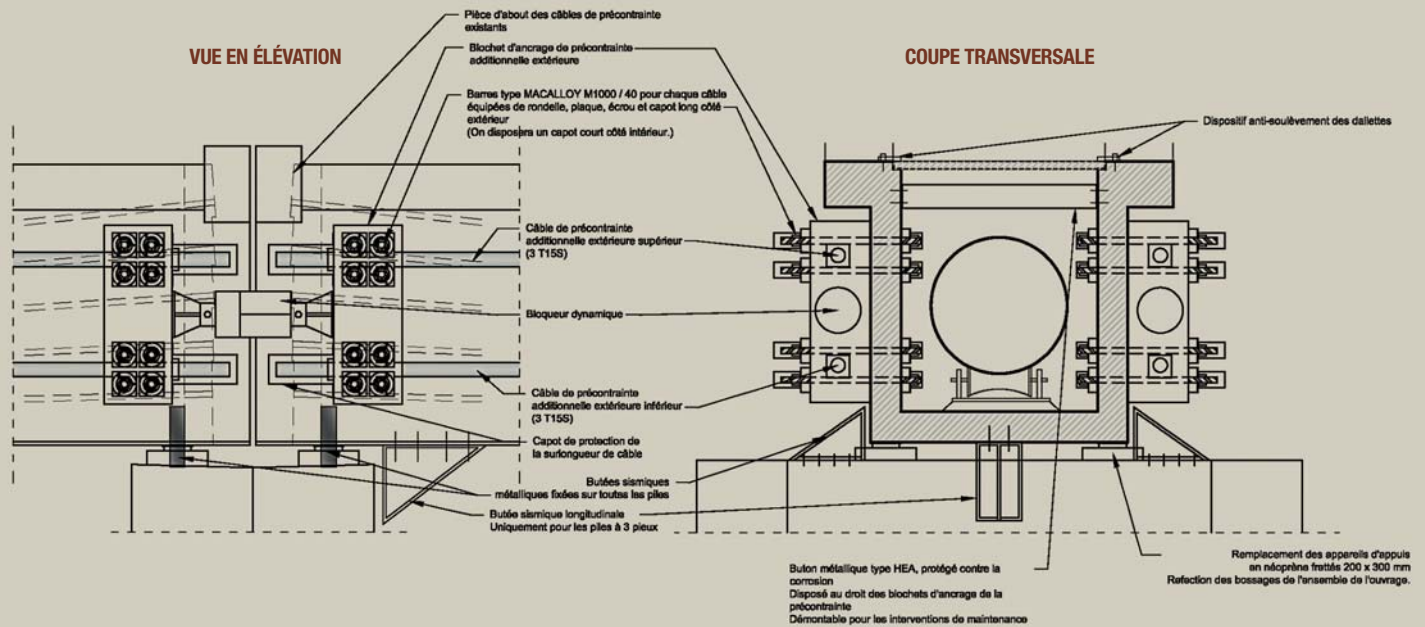
Pour des raisons d'exploitation et de maintenance, l'accessibilité de la conduite ne doit pas être modifiée. Ainsi, tous les nouveaux éléments, y compris la précontrainte additionnelle, sont démontables pour faciliter les interventions ultérieures sur la conduite. Il s'agissait là d'une donnée imposée par le maître d'ouvrage, dont il a fallu ▷

CDS POUR ÉTUDE DE SURTENSION DANS LES CÂBLES EXISTANTS R2



16

ÉLÉVATION ET COUPE PRÉSENTANT LES PRINCIPES DE RENFORCEMENT



17

tenir compte pour concevoir un renforcement entièrement démontable. L'appel d'offres travaux est en cours et plusieurs entreprises spécialisées ont été consultées.

En conclusion, les structures en béton précontraint sont des ouvrages sensibles qu'il convient de bien caractériser si l'on souhaite assurer leur durabilité, tant du point de vue du béton armé que précontraint. Les mesures à l'arbalète permettent d'apprécier la valeur réelle des pertes en regard des pertes forfaitaires, trop souvent considérées dans les projets. L'ouvrage va faire l'objet d'un renforcement statique et dynamique original avec une précontrainte additionnelle servant à la fois à l'attelage des travées, au renforcement

17- Élévation et coupe présentant les principes de renforcement.

17- Elevation view and cross section showing the strengthening techniques.

dynamique sous séisme vertical et au renforcement statique, suivant la durabilité de la précontrainte intérieure. Cette précontrainte additionnelle pourra être retendue si nécessaire, ou démontée en cas de maintenance lourde au niveau du pipe. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société du Pipeline sud-européen (SPSE)

MAÎTRE D'ŒUVRE DU PIPELINE SUD-EUROPÉEN (SPSE) :
 Division Projets et Travaux

ASSISTANCE TECHNIQUE À LA MAÎTRISE D'ŒUVRE :
 Diadès, agence Pays d'Aix

LABORATOIRE EN CHARGE DES INVESTIGATIONS :
 Lerm (diagnostic, essais non destructifs in situ et en laboratoire), assisté du CETE Aix-en-Provence pour les essais à l'arbalète et de Géotec pour les sondages géotechniques

CONTRÔLE EXTERNE DES ÉTUDES DE CONCEPTION :
 Setec TPI, direction Sud-Est

CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Veritas

CSPS : Apave SudEurope SAS, agence d'Avignon

ABSTRACT

DIAGNOSTIC AND RENOVATION OF A SENSITIVE STRUCTURE ON THE SOUTH EUROPEAN PIPELINE

P. SUFFREN, SPSE - F. MARTIN & A. MAZZOCCO, LERM - C. RAULET ET C. CHANONIER, DIADES - J. RESPLENDINO, SETEC TPI

The South European pipeline, an energy artery of Europe built at the end of the 1950s, supplies the refineries and a petrochemicals hub on the Fos-Lyon-Karlsruhe axis (769 km). In its above-ground section, it is supported by a prestressed concrete structure crossing the flood plain of the Durance River (Bouches-du-Rhône region of France). This structure is currently undergoing renovation and anti-seismic strengthening work. Before the techniques that will be applied soon on this sensitive project, this article presents the diagnostic and the plan for strengthening the structure. □

DIAGNÓSTICO Y REHABILITACIÓN DE UNA OBRA SENSIBLE EN EL OLEODUCTO DEL SUR DE EUROPA

P. SUFFREN, SPSE - F. MARTIN & A. MAZZOCCO, LERM - C. RAULET ET C. CHANONIER, DIADES - J. RESPLENDINO, SETEC TPI

El Oleoducto del sur de Europa, vena energética de Europa construida a finales de los años 1950, permite el aprovisionamiento de las refineras y de una plataforma petroquímica en el eje Fos-Lyon-Karlsruhe (769 km). Su tramo aéreo toma apoyo en una estructura de hormigón pretensado que atraviesa el lecho mayor del río Durance (departamento de Bouches-du-Rhône). Actualmente, esta obra es objeto de una rehabilitación y de un refuerzo sísmico. Previamente a las técnicas que se aplicarán próximamente en esta obra sensible, este artículo presenta el diagnóstico y el proyecto de refuerzo de la estructura. □



1- Château
de Versailles.

1- Château
de Versailles.

© DR

CONSTRUCTION D'UNE GALERIE SOUTERRAINE DANS LE CADRE DE LA RÉNOVATION DU CHÂTEAU DE VERSAILLES

AUTEURS : PAULINE BLEICHER, CHEF DE PROJET, SETEC BÂTIMENT - TANCRÈDE DE FOLLEVILLE, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SETEC TPI

AVEC 7,5 MILLIONS DE VISITEURS CHAQUE ANNÉE, LE CHÂTEAU DE VERSAILLES FAIT PARTIE DES CINQ SITES LES PLUS VISITÉS EN FRANCE. CLASSÉ AU PATRIMOINE MONDIAL DE L'HUMANITÉ DEPUIS TRENTE ANS, IL DOIT ÊTRE RÉGULIÈREMENT RÉNOVÉ ET MODERNISÉ POUR GARANTIR UNE BONNE QUALITÉ D'ACCUEIL ET RESTER EN CONFORMITÉ AVEC LES NORMES RÉGISSANT LES ÉTABLISSEMENTS RECEVANT DU PUBLIC. CECI EXIGE LA MISE EN OEUVRE DE NOMBREUX RÉSEAUX ET ÉQUIPEMENTS TECHNIQUES, OPÉRATION TOUJOURS DÉLICATE DANS LES MONUMENTS HISTORIQUES, ET À VERSAILLES EN PARTICULIER.

UN VASTE PÉRIMÈTRE DE TRAVAUX

À la fin de l'année 2004, lorsque Setec bâtiment se voit confier par l'OPPIC - Opérateur du Patrimoine et des Projets Immobiliers de la Culture -, maître d'ouvrage de l'Établissement Public de Versailles, la mission de définition

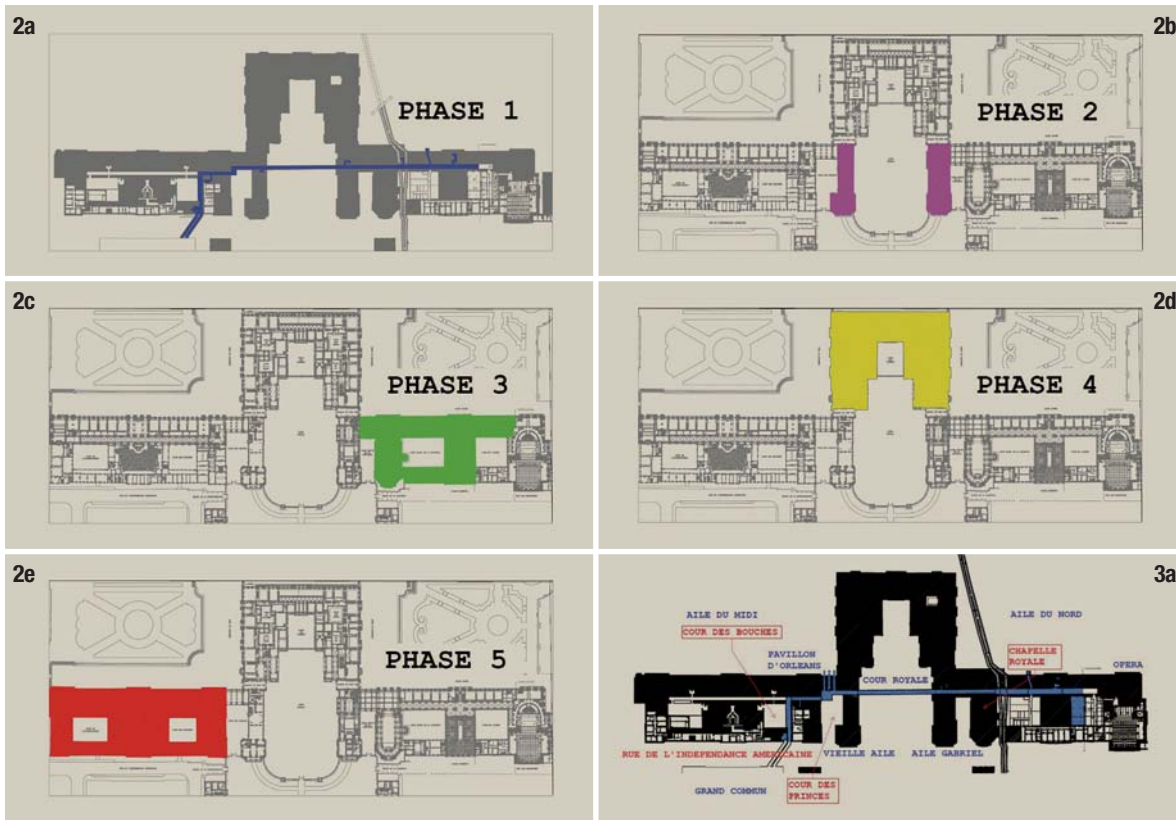
du schéma directeur de rénovation du château, le périmètre des travaux à réaliser en partenariat avec l'Architecte en Chef des Monuments Historiques, Frédéric Didier, est assez vaste. Il comprend notamment la rénovation des réseaux primaires, la mise en sécurité et la mise en sûreté du palais.

Le groupement a aussi en charge d'assurer la maîtrise d'œuvre complète de la première phase de la construction des infrastructures permettant la rénovation des réseaux primaires.

L'équipe de maîtrise d'œuvre commence son travail par des reconnaissances géotechniques des sols et des niveaux

de fondations. Parallèlement, un diagnostic de l'état des réseaux existants est effectué.

Ces études permettent d'identifier l'architecture technique de l'existant et d'envisager les dévoiements de réseaux qu'imposent les travaux de rénovation. ▶



2a à 2e-
Les 5 phases
de rénovation.

3a- Tracé
de la galerie
technique.

3b- Coupe de
pré-synthèse
de la galerie
technique.

4- Élévation
de la galerie
sous la cour
Royale.

2a to 2e-
The five stages
of renovation.

3a- Layout of
the pipe gallery.

3b- Preliminary
synthetic cross
section of the
pipe gallery.

4- Elevation
view of the
gallery under
the Royal
Courtyard.

© SETEC TPI

Les études du schéma directeur sont finalisées en mars 2008 et conduisent à l'établissement d'un plan directeur détaillé en cinq phases de rénovation, dont les travaux s'étalent sur une durée prévisionnelle de 17 ans (figures 2a à 2e).

Progressivement, les différentes ailes du château vont faire l'objet de travaux d'aménagement et d'équipement, dans le respect de l'intégrité du monument. La modernisation et la généralisation des équipements de sûreté et de sécurité incendie sur l'ensemble du site sont également prévues.

UNE GALERIE TECHNIQUE SOUTERRAINE DE 300 m

Le maillon clé de cet ambitieux programme consiste à construire une

nouvelle galerie technique souterraine, longue de 300 m environ, desservant l'ensemble du château et destinée à recevoir les futurs réseaux primaires. Son tracé démarre au Grand Commun, où un nouveau pôle énergie a été créé sous la cour en 2008.

La galerie passe ensuite sous la rue de l'Indépendance américaine pour rejoindre le château sous l'aile du Midi, puis sous la cour des Bouches jusqu'au pavillon d'Orléans. Elle prend ensuite une orientation nord-sud afin d'alimenter les différentes ailes du château, jusqu'à l'opéra, en électricité, chauffage, ventilation, climatisation, plomberie, sécurité incendie et sûreté, en passant successivement sous la cour des Princes, la Vieille Aile, la cour Royale, l'aile Gabriel, la chapelle

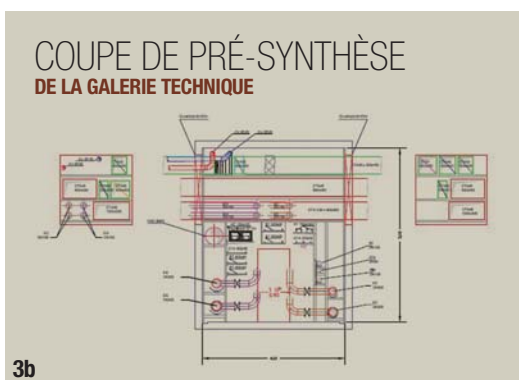
Royale et l'aile du Nord (figures 3a et 3b). Cette galerie technique de forme rectangulaire présente des dimensions moyennes de 4 m de large et 5 m de haut. Sur plusieurs parties du tracé, elle est doublée d'une galerie, juxtaposée ou superposée, pour permettre la circulation du personnel du château en dehors des cheminements publics.

COMMENCEMENT PAR LE MILIEU

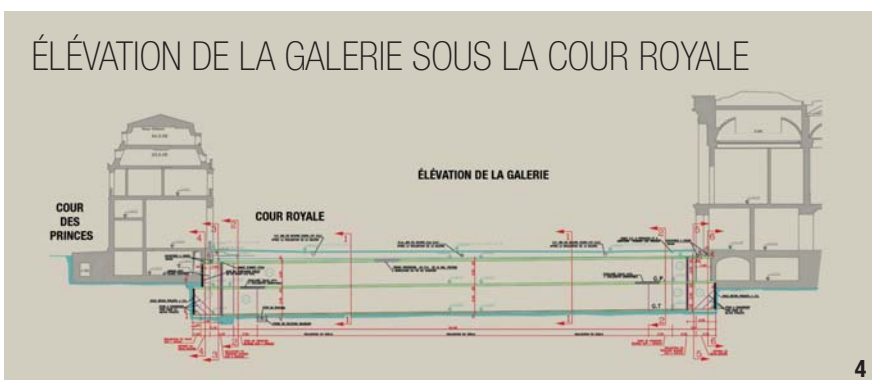
Alors que les études du schéma directeur débutent à peine, l'Oppic décide de profiter des travaux de repavage de la cour Royale, en 2006, pour réaliser le tronçon central de la galerie. Ainsi, Setec anticipe une partie de ses études pour s'insérer dans le planning général des travaux de la cour Royale et lancer un appel d'offres pour la création de

deux galeries superposées liaisonnant l'aile Gabriel et la Vieille Aile. Le marché est attribué à l'entreprise Lefèvre pour 1,3 million d'euros. Les galeries sont en béton armé, et les travaux effectués à ciel ouvert en tranchée blindée depuis la cour Royale, au pied des Grands Appartements.

Les reprises en sous-œuvre locales sous les façades de l'aile Gabriel et de la Vieille Aile s'effectuent par la méthode traditionnelle, avec réalisation de percements dans les soubassements enterrés du palais aux deux extrémités de la double galerie. Ceux-ci sont conçus avec la réalisation d'un poitrail en charpente métallique et le vérinage des fondations sous appuis pour assurer la mise en charge des nouvelles fondations pour limiter les tassements (figure 4).



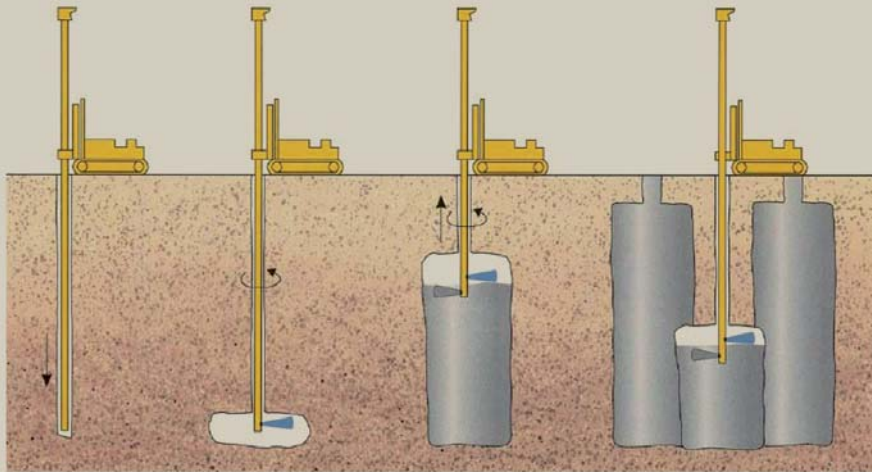
3b



4

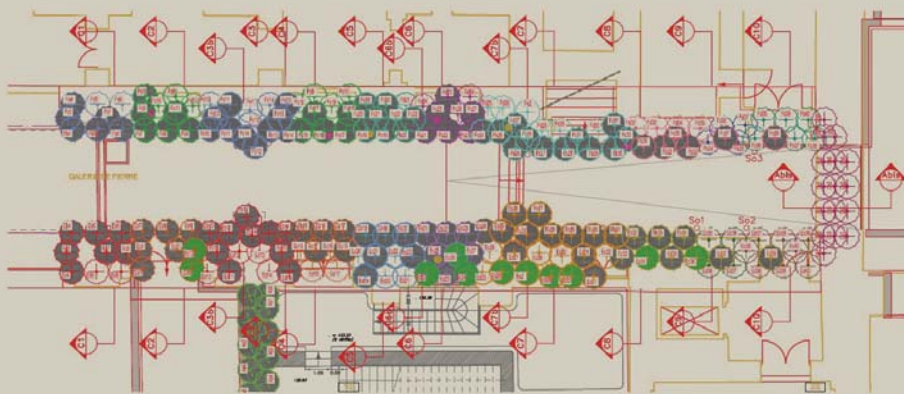
© SETEC TPI

PRINCIPE DU JET-GROUTING



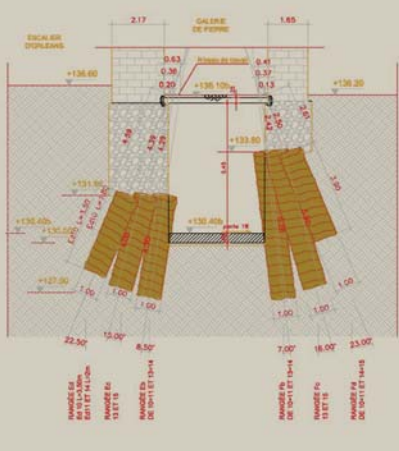
5a

PLAN D'EXÉCUTION DE JET-GROUTING



5b

COUPE TYPE DE JET-GROUTING



6



7

5a- Principe du jet-grouting.

5b- Plan d'exécution de jet-grouting.

6- Coupe type de jet-grouting.

7- Machine de forage de jet-grouting.

5a- Jet grouting schematic.

5b- Jet grouting working drawing.

6- Typical jet grouting cross section.

7- Jet grouting drilling machine.

la réalisation d'une colonne et celle des colonnes adjacentes (figures 5a, 5b et 6).

Pour respecter le parti pris architectural de l'Architecte en Chef, qui consiste à laisser la majorité des maçonneries apparentes pour constituer les pieds droits de la galerie, Setec et Terrasol (société du groupe Setec) ont proposé une conception audacieuse, basée sur les résultats des campagnes de reconnaissance géotechnique.

L'objectif est de profiter des fondations relativement peu profondes et bien conservées du château pour réaliser en sous-face un massif de jet-grouting de forme trapézoïdale, constitué de plusieurs colonnes sécantes d'inclinaison variable couvrant au minimum 80 % du massif de fondations.

Cela doit permettre de conserver l'effort résultant de la descente de charge du château et des poussées horizontales du terrain dans le noyau central du massif.

L'ensemble est toujours comprimé et simplement butonné par les dalles hautes et basses de la galerie, qui doivent rester les seuls éléments en béton armé de la structure. La hauteur de colonnes varie entre 2,50 et 7,50 m, de manière à ce que la fiche se situe au minimum à 2 m sous le plan inférieur du radier, tandis que leur inclinaison maximale peut atteindre 32°. Sur l'ensemble du tracé de la galerie, le linéaire total de colonne de jet-grouting est de l'ordre de 2 250 m.

Pour le seul lot génie civil, le montant de la première tranche de travaux s'élève à 5,26 millions d'euros. ▷

REPRISE DES FONDATIONS DU CHÂTEAU

Parallèlement à ce chantier, les études du schéma directeur se poursuivent, mais la réalisation des autres tronçons de la galerie technique est particulièrement délicate car elle nécessite de reprendre en sous-cœuvre les fondations

qui la jouxtent. Setec propose d'effectuer ce travail par jet-grouting dès que cela est possible, en lieu et place de la méthode traditionnelle.

Ce procédé plus moderne, déjà éprouvé au Grand Palais ou à la tour de Pise, est en effet bien adapté aux monuments anciens, car il évite de décompresser la

sous-face des murs en maçonneries. Pour ne pas déstabiliser les fondations, Setec retient l'utilisation du mono-jet, ce qui limite le diamètre des colonnes à 1 m maximum.

La méthode de forage est exécutée par pianotage, en laissant un délai minimal de prise du béton de sept jours entre

DES TRAVAUX SOUS SURVEILLANCE PERMANENTE

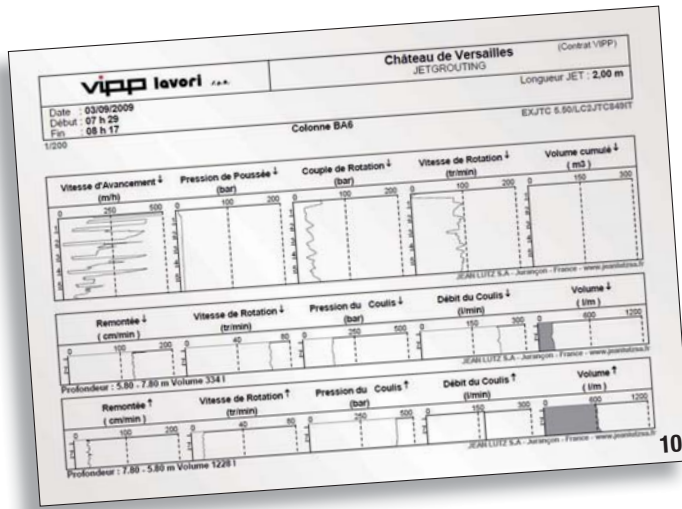
L'appel d'offres est lancé à l'été 2008, et le marché est attribué au groupement franco-italien Parenghe-Vipp Lavori, qui possède une solide expérience en matière de reprise en sous-œuvre, notamment en jet-grouting. De plus, l'entreprise italienne dispose d'une machine de petites dimensions permettant de forer des colonnes dans des conditions particulièrement exigües (photo 7).

Les travaux commencent en janvier 2009 par une quinzaine de colonnes de jet-grouting dans la cour des Bouches, constituant un plot d'essai phasé en trois étapes : réalisation de colonnes au centre de la cour, essais de chargement de trois de ces colonnes, puis colonnes *in situ* sur un linéaire de fondations réduit.

Les valeurs d'écrasement à la rupture obtenues sur les premières carottes sont bonnes, et plutôt supérieures à ce qui était escompté. Le bureau d'étude d'exécution Enser retient finalement une valeur moyenne de résistance à la compression de 15 MPa, et les travaux de la galerie technique dans la cour des Bouches peuvent commencer (photo 8).

Vipp Lavori effectue des carottages de contrôle dans les colonnes de jet à la fréquence d'une colonne sur dix. Ces carottages sont réalisés en alternance au centre de la colonne ou excentrés à 40 cm. Des prélèvements de spoils sont également effectués sur chaque colonne de jet pour remplir trois éprouvettes, respectivement écrasées à 7, 14 et 28 jours. Les résultats de ces contrôles sont soumis à l'approbation de la maîtrise d'œuvre et d'Arcadis, titulaire de la mission G4 (photo 9 et figure 10).

Les travaux s'effectuent sous la surveillance permanente d'un système de monitoring renforcé. La façade du palais est équipée de géophones pour détecter les vibrations engendrées par le jet, car les forages à travers les maçonneries existantes sont réalisés à l'aide d'un tricône. Les plus grosses fissures de la façade sont instrumentées par des fissuromètres (photo 11). La cadence de réalisation du jet-grouting est d'environ 15 colonnes par semaine. Toutes les heures, un théodolite automatique procède au relèvement d'une vingtaine de cibles positionnées sur la façade. Les variations sont corrigées automatiquement des mouvements naturels de l'édifice, par comparaison avec des cibles références situées sur des façades voisines



non concernées par la reprise en sous-œuvre. L'objectif est de rester en dessous d'un seuil de tassement global fixé par le CCTP à 5 mm cumulés.

UNE FOSSE D'AISANCE SOUS L'ESCALIER D'ORLÉANS

Les travaux de jet-grouting dans la cour des Bouches, qui se déroulent en mai 2009, donnent lieu à diverses surprises, notamment la découverte d'une fosse d'aisance sous l'escalier d'Orléans. Oubliée des relevés de géomètre et ne figurant pas sur les plans du château, inconnue aussi des services d'exploitation, cette cavité souterraine voûtée, parfaitement conservée, de 3 m de hauteur pour une longueur de 18 m, servait à la récupération des excréments des latrines du château. L'ancêtre d'une fosse septique, en quelque sorte, sauf que le travail de purge n'était pas effectué par des enzymes mais par les serviteurs du roi (photo 12). L'existence de cette fosse conduira l'Architecte en Chef à modifier la géométrie d'un des escaliers de secours de la galerie technique, et à adapter la structure du tronçon sous la galerie de Pierre adjacente.

8- Travaux de la galerie technique dans la « Cour des Bouches ».

9- Carottes de contrôle de jet-grouting.

10- Paramètres de contrôle de forage.

11- Instrumentation par fissuromètre.

12- Fosse d'aisance sous l'escalier d'Orléans.

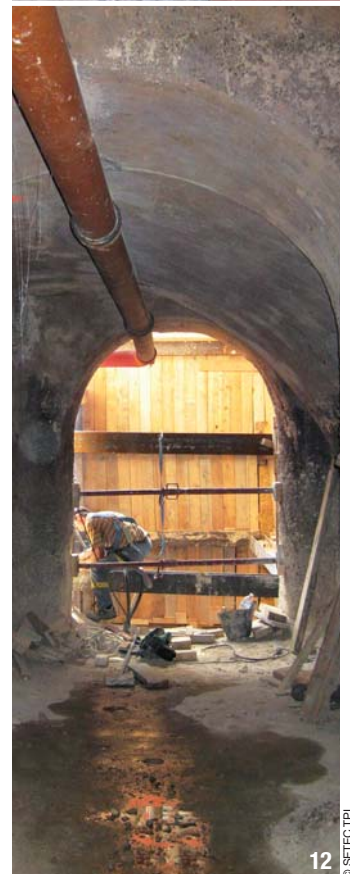
8- Work on the pipe gallery in the «Cour des Bouches» courtyard.

9- Core samples for jet grouting monitoring.

10- Drilling monitoring parameters.

11- Crack measurement instrumentation.

12- Septic tank under the Orléans stairway.



VOÛTES D'ARÊTE SOUS LA COUR DES PRINCES



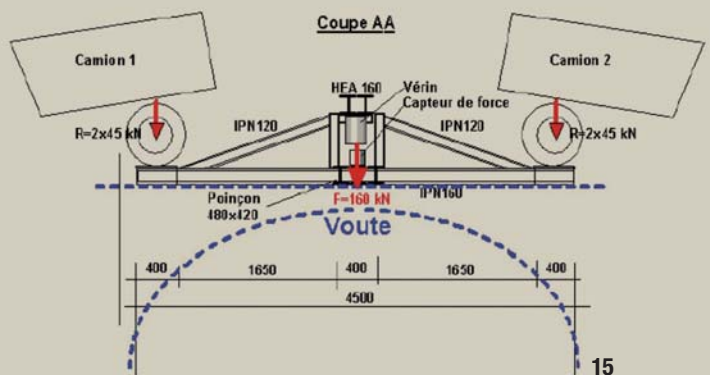
13- Voûte d'arête sous la cour des Princes.
14- Principe d'instrumentation des voûtes.
15- Schématique de l'essai de poinçonnement.
16- Essai de poinçonnement.

13- Groined vault under the «Cour des Princes» courtyard.
14- Schematic of arch instrumentation.
15- Schematic of the punching test.
16- Punching test.

Au sud de la cour Royale, la cour des Princes est le point de passage obligé des touristes qui souhaitent se rendre dans les jardins du château. Mais les millions de visiteurs qui la traversent chaque année ne soupçonnent pas que, sous leurs pieds, se trouvent les anciennes citernes ou viviers du Roi. Ces salles successives, en voûtes d'arête, étaient autrefois utilisées pour la garde des poissons destinés au Grand Canal, puis ont servi de réserves d'eau pendant la Seconde Guerre mondiale, en cas d'incendie du palais. Lorsque le chantier commence, elles contiennent encore plusieurs m³ d'eau et sont rapidement vidangées, car le projet prévoit de les réaménager en sanitaires publics dans le cadre du nouveau hall d'accueil des visiteurs qui doit être créé sous la cour des Princes, et dont la réalisation est différée pour des raisons budgétaires.

Le programme demande de garantir l'accès en surface aux véhicules des pompiers qui, jusqu'à présent, n'ont pas le droit de rouler dans la cour, et donc de circuler sur ces voûtes. C'est le début de nouvelles difficultés, car les visites effectuées en mars 2009 révèlent que l'état de conservation des voûtes d'arête est très hétérogène selon les salles, ce qui rend toute justification par le calcul assez hasardeuse. Setec propose alors à l'Oppic de réaliser des essais de chargement pour analyser le comportement des voûtes. Ces essais sont réalisés en mai 2009 par le CSTB, sous la direction de MM. Chenaf et Revillon. Chaque clef de voûte est appareillée d'un fil inextensible relié au sol par un capteur vertical capable de mesurer les déplacements avec une précision de l'ordre du micromètre.

La technique proposée par le CSTB consiste à charger l'ouvrage de manière progressive jusqu'à atteindre les 16 t du véhicule des pompiers, tout en contrôlant les déplacements pour détecter l'éventuelle apparition d'un palier plastique. La construction d'un prototype en charpente métallique permettra même de simuler le cas de charge de poinçonnement du vérin du camion et d'éprouver la résistance des voûtes (photos 13, 14, 16 et figure 15).



DES FONDATIONS IRRÉGULIÈRES ET ALTÉRÉES

Les travaux de reprise en sous-œuvre pour la création de l'escalier d'accès dans l'aile du Midi et pour le tronçon de galerie technique situé sous la galerie de Pierre vont réserver quelques mauvaises surprises.

Les forages des colonnes de jet-grouting montrent en effet que l'épaisseur des maçonneries traversées est très

variable suivant les endroits, et bien différente des extrapolations linéaires faites en études d'après les sondages géotechniques.

Le système de fondations présente en réalité, sous la galerie de Pierre, un profil en créneaux correspondant à des fondations isolées de pilastres avec un chaînage en tête. De plus, les volumes de coulis injectés sont parfois très supérieurs aux volumes théoriques

attendus, ce qui incite Setec à procéder à quelques investigations supplémentaires.

L'analyse des carottes et un terrassement de 50 cm de profondeur sur tout le linéaire de ce tronçon mettront en évidence une fondation assez altérée, sans cohésion, avec une absence totale de liant entre les pierres.

Dans ce contexte, il devient difficile de conserver les parements maçonnés

apparents comme pieds droits naturels de la galerie. Après plusieurs échanges avec le bureau d'études d'exécution, les interventions de M. Bustamante, consultant de l'entreprise Parengé, et d'experts de Setec, la maîtrise d'œuvre propose de régénérer les maçonneries de fondation, d'en caractériser les performances par des essais et de créer des cadres en béton armé aux endroits les plus critiques.

17- Galerie sous cour Royale.

18- Principe de la voûte parapluie 2.

17- Gallery under the Royal Courtyard.

18- Schematic of umbrella arch 2.

**PROCHAINE ÉTAPE :
 LA CHAPELLE ROYALE**

La réalisation de ce tronçon de galerie technique, qui fait partie de la dernière tranche de travaux de la phase 1, est prévue entièrement en souterrain sous la chapelle Royale, par l'un des deux accès possibles : la galerie de la cour Royale ou la galerie Aile du Nord.

La méthode proposée par Setec sera celle de la voûte parapluie, par segments de 6 m de longueur. Le choix de cette technique a été guidé, d'une part, par la volonté de ne pas intervenir dans l'enceinte même de la chapelle et de son vestibule, et, d'autre part, par la disposition des fondations, qui se trouvent au-dessus du passage de cette galerie.

La méthodologie envisagée pour un segment de 6 m de longueur consiste à créer, par du béton projeté fibré, le cadre servant de fenêtre de tir de la voûte parapluie, puis à foncer 15 tubes pétroliers de diamètre 127 mm et de longueur 9 m.

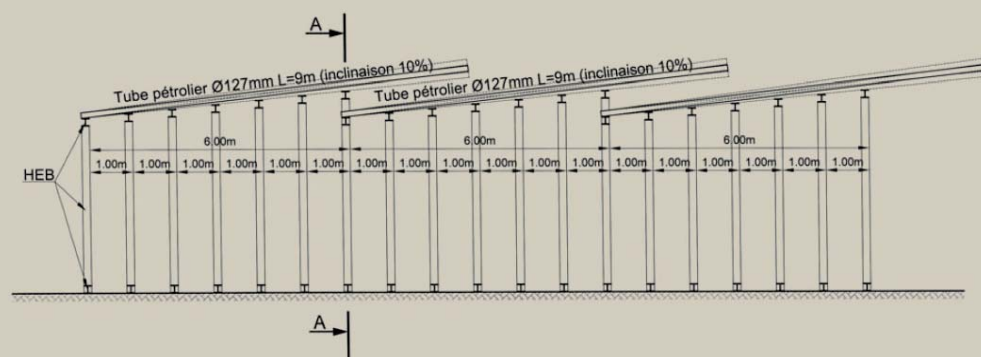
On met alors en place des boulons en fibres de verre scellés à la résine et injectés au tube à manchette dans les sables, et on excave pour réaliser le cadre (figure 18).

Les contraintes liées à la réalisation des travaux sur le site sont donc multiples : maintien de certains réseaux tech-



17

PRINCIPE DE LA VOÛTE PARAPLUIE 2



18

niques existants, mise en conformité et intégration des équipements techniques normés dans les décors historiques, plannings des travaux établis selon la haute ou la basse saison, travaux architecturaux et techniques dans une même enveloppe budgétaire, typologie des

marchés différente selon la stratégie de contractualisation, continuité de l'ouverture du palais durant les travaux. Dans le cas de restructurations lourdes, la connaissance et le respect de l'existant constituent également des données essentielles de la réflexion.

Mais, surtout, la multiplicité des contraintes et des configurations du chantier, ainsi que le respect du monument historique, conduisent les ingénieurs responsables du projet à adapter sans cesse les solutions techniques au cas par cas. □

ABSTRACT

CONSTRUCTION OF AN UNDERGROUND GALLERY AS PART OF THE RENOVATION OF THE CHÂTEAU DE VERSAILLES

PAULINE BLEICHER, SETEC - TANCREDE DE FOLLEVILLE, SETEC TPI

With 7.5 million visitors each year, the Chateau de Versailles is one of the five most visited attractions in France. Moreover, it has been classified as a World Heritage Site for thirty years now, and must regularly be renovated and modernised to ensure a good quality of reception for tourists and stay in conformity with the standards governing public buildings. But this often requires the installation of numerous utilities and technical facilities, which is always tricky in Historical Monuments in general, and at Versailles in particular. □

CONSTRUCCIÓN DE UNA GALERÍA SUBTERRÁNEA EN EL MARCO DE LA RENOVACIÓN DEL CASTILLO DE VERSAILLES

PAULINE BLEICHER, SETEC - TANCREDE DE FOLLEVILLE, SETEC TPI

Con 7,5 millones de visitantes anuales, el Castillo de Versailles es uno de los cinco lugares más visitados de Francia. Además, al estar clasificado desde hace treinta años en el patrimonio mundial de la humanidad, debe ser reformado y modernizado regularmente para garantizar una acogida de calidad a los turistas y estar en conformidad con las normas que rigen los Establecimientos abiertos al público. Pero frecuentemente esto requiere la implementación de numerosos equipos técnicos y redes, lo que siempre es delicado en los Monumentos Históricos en general, y en Versailles en particular. □



RÉHABILITATION DE LA FRICHE INDUSTRIELLE DE WATTRELOS (59) : TRAITEMENT DU GRAND TERRIL DE CHROME PAR BIO-PRÉCIPITATION *IN SITU*

AUTEURS : THIERRY GISBERT ET LUDOVIC FERRIÈRE, ARCADIS - JEAN-LOUIS MAUSS, RHODIA

LA TECHNIQUE DE LA BIO-PRÉCIPITATION *IN SITU* EST UN TRAITEMENT BIOLOGIQUE QUI PERMET, EN CONDITIONS ANAÉROBES, LA PRÉCIPITATION DES MÉTAUX LOURDS. LE PRINCIPE REPOSE SUR LA STIMULATION DE LA CROISSANCE DE MICRO-ORGANISMES PAR L'AJOUT CONTRÔLÉ ET MAÎTRISÉ DE SUBSTANCES NUTRITIVES NATURELLES, TELLES QUE LA MÉLASSE, QUI VONT MODIFIER LES CONDITIONS PHYSIQUES DU MILIEU ET ENGENDRER LA PRÉCIPITATION DES MÉTAUX SOUS FORME NON SOLUBLE ET BEAUCOUP MOINS TOXIQUE QUE LE PRODUIT DE DÉPART. CETTE TECHNIQUE EST ACTUELLEMENT MISE EN ŒUVRE SUR LE GRAND TERRIL DE CHROME DE WATTRELOS (59), AU SEIN D'UNE VASTE FRICHE INDUSTRIELLE EN COURS DE RÉHABILITATION, AFIN D'ABATTRE LA POLLUTION AU CHROME VI. EN RAISON DES CONDITIONS DRASTIQUES RENCONTRÉES SUR LE SITE, LE PROCÉDÉ A D'ABORD ÉTÉ TESTÉ EN LABORATOIRE ET SUR LE TERRAIN AVANT SA MISE EN ŒUVRE INDUSTRIELLE.



1- Ouverture de la géomembrane pour réaliser une tranchée dans les résidus chargés en Cr (VI).

2- Vue d'ensemble du grand terril de chrome de Watrelos.

1- Opening the geomembrane barrier to execute a trench in residues charged with Cr (VI).

2- General view of the large chromium waste heap of Watrelos.

UNE ANCIENNE DÉCHARGE SOURCE D'IMPORTANTES POLLUTIONS

Le site de l'ancienne usine PCUK de Watrelos (59) fait partie d'un vaste projet de réhabilitation visant à recréer une trame verte au droit du canal de Roubaix (photo 3). Dans ce cadre, Rhodia, propriétaire des terrains, envisage une réhabilitation durable du grand terril qui occupe une superficie de 7 ha à sa base et dont la hauteur atteint 16 m. Cette ancienne décharge datant du début du XX^e siècle a été utilisée par plusieurs industriels, qui y ont stocké les résidus de traitement du minerai, très chargés en chrome hexavalent, Cr (VI). Actuellement, après plusieurs phases de travaux de confinement hydraulique – barrière étanche, couverture avec une géomembrane bitumineuse (photo 4) –, le grand terril produit encore quotidiennement une moyenne de 15 à 20 m³ de percolats (photo 5) chargés en Cr⁶⁺ (200 à 1 200 mg/l). Ces eaux très polluées sont traitées dans une station externe, ce qui représente un coût annuel considérable. La solution est jugée insatisfaisante et non durable dans la mesure où ce traitement ne

cessera qu'à long terme (100 ans), sans modification des causes générant les lixiviats.

Arcadis a donc proposé de traiter l'ensemble du grand terril par la technique de bio-précipitation *in situ* du Cr (VI), qui permettra, à moyen terme (trois à six ans), de stabiliser définitivement le grand terril, libérant Rhodia de toute

obligation de traitement des lixiviats à long terme.

Préalablement à la mise en œuvre industrielle de cette technique (actuellement en cours), Arcadis s'est attaché à en démontrer le bien-fondé par le biais d'un pilote de laboratoire recréant, à petite échelle, les processus mis en jeu, puis par un pilote de terrain.



STIMULER LA CROISSANCE DE MICRO-ORGANISMES

En conditions aérobies, la bio-précipitation permet le traitement *in situ* de nombreuses familles de polluants telles que les hydrocarbures, les solvants chlorés, et la pollution liée à de nombreuses espèces métalliques, notamment le Cr (VI). Le procédé consiste à stimuler la croissance de micro-organismes par l'ajout contrôlé et maîtrisé, au sein du milieu pollué, de substances nutritives naturelles (telles que la mélasse, des sirops de maïs, des résidus de laiterie et fromagerie, etc.). Ces nutriments vont modifier les conditions physiques du milieu et entraîner la précipitation des métaux sous forme d'hydroxydes ou de sulfures non solubles, beaucoup moins toxiques que le produit de départ, ainsi que la réduction d'éventuels composés organochlorés. Ces processus sont dirigés par l'activité biologique : le polluant lui-même n'est pas utilisé par les micro-organismes dans la mesure où il n'est pas consommé ni respiré par les bactéries, mais les sucres (donneurs d'électrons) sont oxydés lors de la dégradation biologique, tandis que les cations métalliques (accepteurs d'électrons) sont réduits et précipitent sous une forme très peu soluble (hydroxydes et sulfures principalement). En parallèle, les solvants chlorés sont dégradés s'ils sont présents. Le traitement génère le développement de bactéries sulfato-réductrices qui produisent le sulfure d'hydrogène requis pour la précipitation de sulfures métalliques insolubles.

L'oxygène, les nitrates, le fer et le manganèse, les sulfates et le dioxyde de carbone sont successivement réduits et consommés lors des réactions mises en jeu, puisqu'ils agissent également comme « donneurs d'électrons » (figure 6). Pour autant, les conditions méthanogènes strictes ne sont pas systématiquement requises pour permettre la précipitation des métaux.

UNE PREMIÈRE EN EUROPE

Appliquée aux métaux, la technique de bio-précipitation *in situ* n'a pas encore été mise en œuvre en Europe. Elle l'est ailleurs dans le monde, notamment aux États-Unis, dans des conditions de pH et de concentrations en Cr⁶⁺ beaucoup moins contraignantes. ▶



3- Vue d'ensemble des travaux de réhabilitation de la friche.
 4- Le grand terril recouvert de la géomembrane bitumineuse.
 5- Lixiviats chargés en Cr (VI).
 6- Processus respiratoires/ conditions redox (valeurs moyennes ; d'après Suthersan, 2002).

3- General view of the waste land reclamation work.
 4- The large waste heap covered with the bituminous geomembrane barrier.
 5- Leachates charged with Cr (VI).
 6- Respiratory processes/ redox conditions (mean values; based on Suthersan, 2002).

En effet, dans le cas du grand terril, le milieu initial (pH = 12 à 14 et chrome dissous atteignant 4 g/l) est potentiellement très peu propice à la survie des bactéries. L'équipe projet a donc dû convaincre les parties prenantes (administration de tutelle : Dreal ; cofinanceurs : Établissement public foncier, collectivités locales et Rhodia) de la faisabilité technique et financière du projet, en sensibilisant aux enjeux, en expliquant l'état de l'art de ces techniques et en proposant une démarche scientifique d'essais en laboratoire puis de test en pilote industriel sur le terrain avant le développement de la phase industrielle.

TRANSVERSALITÉ TECHNIQUE

L'équipe projet se compose de quatre ingénieurs confirmés, dont les formations et les parcours professionnels divergent : ingénieur et docteur en géologie, agronome, environnementaliste. Deux sont des concepteurs issus du secteur du traitement des déchets, les autres des spécialistes des travaux de

dépollution des sols. Le projet fait appel à des connaissances pluridisciplinaires dans les domaines de la biologie et de la microbiologie, de la chimie, de la géologie, de la géophysique et de l'électrotechnique. La création du pilote en laboratoire a nécessité l'adaptation de matériel habituellement utilisé en mécanique des sols, et les techniques d'injection de mélasse mises en œuvre ont été

inspirées du retour d'expérience en matière de recirculation des lixiviats sur les installations de stockage des déchets ménagers, ainsi que des techniques de dépollution des sols. Enfin, l'agressivité chimique des résidus traités a nécessité une application rigoureuse de procédures spécifiques d'hygiène et sécurité, élaborées avec certains clients du secteur de la pétrochimie.

CONTRIBUTION

AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

À la différence d'un pompage à long terme (100 ans minimum) des percolats ou d'un transfert de la pollution au Cr⁶⁺ par écoulement vers la station d'épuration urbaine, la bio-précipitation permet de neutraliser en quelques années le risque environnemental et sanitaire lié à ces résidus. Le projet de Wattrelos représente un investissement

PROCESSUS RESPIRATOIRES / CONDITIONS REDOX

(VALEURS MOYENNES ; D'APRÈS SUTHERSAN, 2002)

Temps	E _n (mV) (max.)	Processus respiratoire	Principales familles bactériennes	Accepteurs d'électrons	Sous produits
Début du processus	< 900 mV	Aérobic	variées	O ₂	CO ₂
↓	< 700 mV	↓ Dénitrification	dénitrifiantes	NO ₃ ²⁻	NO ₂ , N ₂
↓	< 600 mV	↓ ↓ Réduction du manganèse	Fe/Mn réductrices	Mn ⁴⁺	Mn ²⁺
↓	< 0 mV	↓ ↓ Réduction du Chrome et du Fer	sulfato-réductrices	Cr ⁶⁺ , Fe ³⁺	Cr ³⁺ , Fe ²⁺
↓	< -150 mV	↓ ↓ Réduction des sulfates	↓	SO ₄ ²⁻	H ₂ S, HS ⁻
Fin du processus	< -250 mV	↓ ↓ Méthanogenèse	méthanogènes	CO ₂	CH ₄

d'environ 2 millions d'euros à court terme pour éviter des dépenses de traitement (fonctionnement) estimées entre 0,5 et 1 million d'euros par an pendant plusieurs décennies. La mise en œuvre à l'échelle industrielle du projet génère une activité économique locale : forages, analyses, terrassements, etc. Ce projet s'inscrit par ailleurs dans une démarche de valorisation durable des terrains et d'aménagement urbain des

bords du canal de Roubaix conduit par Lille Métropole Communauté urbaine (LMCU). Il améliore directement le cadre de vie des riverains et des gens du voyage fréquentant les abords du terri, et contribue à leur sécurité sanitaire.

ÉTUDES EN LABORATOIRE

Afin de démontrer la faisabilité de cette technique, l'équipe projet a fait circuler des lixiviats chargés en Cr⁶⁺

7- Schéma de principe de l'expérimentation.

8- Résultats obtenus lors de l'expérimentation en laboratoire.

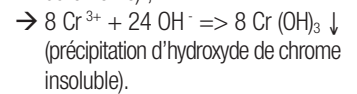
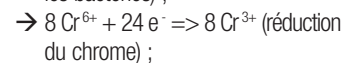
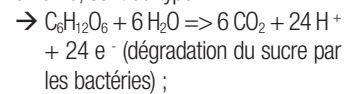
9- Mise en œuvre de la dépollution sur site.

7- Schematic diagram of the experiments.

8- Results obtained during experiments in laboratory.

9- Pollution removal on site.

à travers deux colonnes (colonne témoin et colonne pilote) constituées de résidus chromés et de limons sous-jacents prélevés sur le site. Dans la deuxième colonne, un réactif a été ajouté (mélasse), à faible dose et à deux reprises (dimensionnement par Arcadis), afin de générer les processus décrits plus haut. Les réactions biochimiques recherchées, dans le cas du chrome, sont du type :



Le succès de l'expérimentation devait donc se traduire par l'obtention, au sortir de la colonne pilote, d'un lixiviat à teneur en chrome fortement réduite par rapport au lixiviat obtenu dans la colonne témoin, sans ajout de mélasse et toutes choses égales par ailleurs. Dans chacune des deux colonnes, on procédait à la circulation lente du lixiviat correspondant. Les lixiviats sortants ont été prélevés et analysés régulièrement afin de démontrer la diminution de leur teneur en chrome (figure 7).

Les résultats obtenus (figure 8) confirment l'applicabilité de la technique dans le cas du grand terri de Wattrelos :

→ En fin de traitement, les teneurs en Cr^{total} et en Cr⁶⁺ des percolats sont devenues inférieures à 1 mg/l en sortie de la colonne pilote, alors qu'elles avoisinent 1 200 mg/l en sortie de la colonne témoin, comme dans le lixiviat d'alimentation (photo 10) ;

→ Les bactéries aérobies, initialement prépondérantes, ont cédé la place aux bactéries sulfato-réductrices au bout de deux mois. Ces populations sont naturellement présentes dans les matériaux traités puisqu'aucun ajout de germes bactériens n'a été effectué.

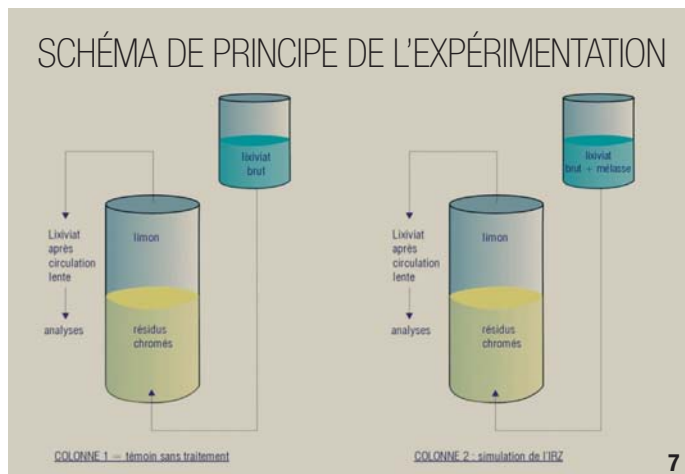
PILOTE INDUSTRIEL SUR SITE

Sur la base des bons résultats obtenus en laboratoire, un pilote de terrain a été réalisé et suivi durant l'année 2009 : une zone du site a été équipée de différents systèmes d'injection, conformément à la figure 9. Afin de vérifier le dimensionnement d'ensemble, l'équipe projet a :

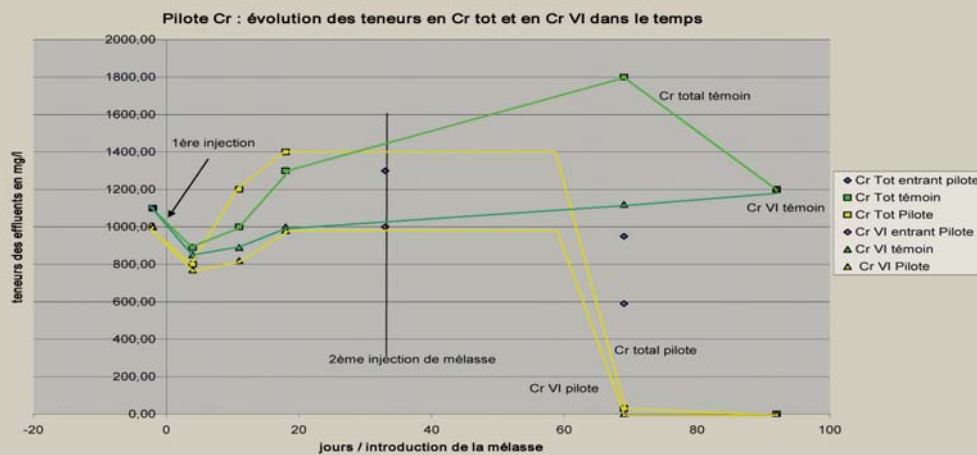
→ Évalué la répartition de la pollution dans le terri. Les zones les plus chargées en Cr (VI) se situent 4 m au-dessus de la nappe ;

→ Vérifié que l'injection de liquides ne mettrait pas en péril la stabilité d'ensemble du terri ;

SCHÉMA DE PRINCIPE DE L'EXPÉRImentation

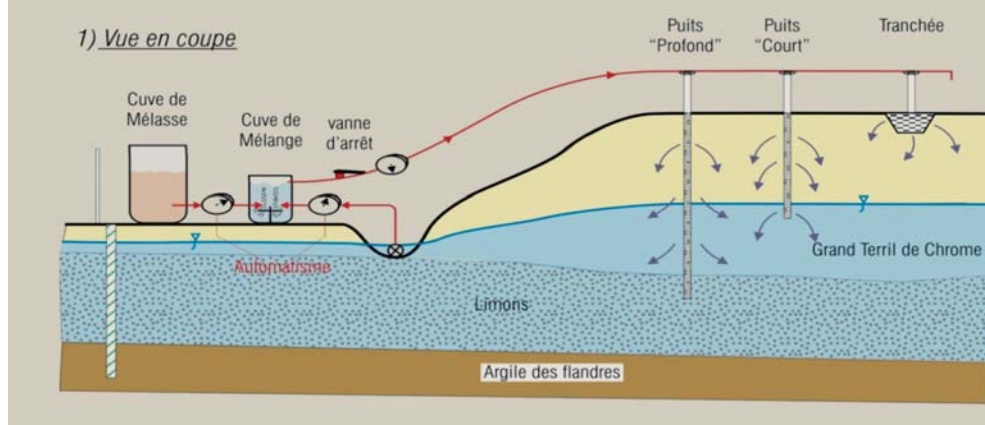


RÉSULTATS OBTENUS LORS DE L'EXPÉRImentation EN LABORATOIRE



MISE EN ŒUVRE DE LA DÉPOLLUTION SUR SITE

1) Vue en coupe



→ Vérifié à l'aide de tests de résistivité électrique que les liquides diffusaient correctement au sein des résidus. La perméabilité des résidus est suffisante pour permettre l'injection des liquides et de la mélasse.

Au bout de trois mois, les premiers résultats ont confirmé la faisabilité du traitement sur site. Cette phase de pilote de terrain a également permis d'apprécier l'hétérogénéité du terril en termes de répartition de la pollution et de définir les zones initialement plus favorables au traitement. Certaines de ces zones présentent déjà des précipitations de Cr (III) spontanées (photo 11).

MISE EN ŒUVRE SUR L'ENSEMBLE DU SITE

Les résultats obtenus au cours des pilotes ont conduit au dimensionnement du traitement suivant :

→ Mise en œuvre des puits de pompage et d'injection (photo 12) ;

→ Mise en œuvre des tranchées d'injection (photo 1) ;

→ Injection dans les eaux souterraines et dans la couche de matériaux la plus impactée par l'intermédiaire de 90 puits (photo 13) ;

→ Injection dans les matériaux non saturés par l'intermédiaire de 1,5 km de tranchées de subsurface.

La durée du traitement est comprise entre trois et cinq ans. L'ensemble des injections est réalisée par une unité automatisée de mélange qui permet de cibler les zones à injecter pour garantir une efficacité maximale du traitement. □



10- Vue des colonnes et des lixiviats en fin d'expérimentation.

11- Précipitation spontanée de Cr (III), bleu, dans les zones riches en matière organique.

12- Foration des puits d'injection et de pompage sur le terril de chrome.

13- Injection de mélasse dans un puits.

10- View of the tower reactors and leachates at the end of the experiments.

11- Spontaneous precipitation of Cr (III), blue, in areas rich in organic matter.

12- Drilling injection and pumping shafts on the chromium waste heap.

13- Injection of molasses into a shaft.

[Références]

- Burdick, J. and Gisbert, T., In situ biological stabilization of chromium in a former industrial landfill in France; *Consoil Conference proceedings*, Bordeaux, France, October 6th 2005.
- Dennis, E. and Suthersan, S., Microbial Precipitation of Dissolved Metals Using Molasses, *EPA542-N-98-010*, No. 30, December 1998.
- Gisbert, T. and Burdick, J., Application of in situ reactive zone – IRZ: in situ biological stabilization of chromium in a former industrial landfill, *Proceedings Sardinia 2005, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium*, CISA Publisher, Cagliari, Italy; 3 - 7 October 2005.
- Suthersan, S., Natural and Enhanced Remediation Systems, Lewis Publishers, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 2002.

ABSTRACT

RECLAMATION OF WATTRELOS INDUSTRIAL WASTE LAND: TREATMENT OF THE LARGE CHROMIUM WASTE HEAP BY *IN-SITU* BIOPRECIPITATION

THIERRY GISBERT & LUDOVIC FERRIÈRE, ARCADIS - JEAN-LOUIS MAUSS, RHODIA

The *in-situ* bioprecipitation technique is a biological process which can be used, in anaerobic conditions, for the precipitation of heavy metals. The technique is based on stimulation of the growth of micro-organisms by the monitored and controlled addition of natural nutrient substances, such as molasses, which will alter the physical conditions of the environment and cause precipitation of the metals into an insoluble form far less toxic than the original product. This technique is currently being applied on the large chromium waste heap at Wattrelos, in a vast industrial waste land undergoing reclamation, in order to bring down the level of chromium VI pollution. Due to the drastic conditions found on site, the process was first tested in laboratory and in the field before being applied industrially. □

REHABILITACIÓN DE LA ZONA INDUSTRIAL EN DESUSO DE WATTRELOS (59): TRATAMIENTO DEL GRAN ESCORIAL DE CROMO POR BIOPRECIPITACIÓN *IN SITU*

THIERRY GISBERT & LUDOVIC FERRIÈRE, ARCADIS - JEAN-LOUIS MAUSS, RHODIA

La técnica de la bioprecipitación *in situ* es un tratamiento biológico que permite la precipitación de los metales pesados en condiciones anaerobias. El principio se basa en estimular el crecimiento de microorganismos mediante el añadido controlado y gestionado eficazmente de sustancias nutritivas naturales, como la melaza, que modifican las condiciones físicas del medio y provocan la precipitación de los metales en forma no soluble y mucho menos tóxica que el producto inicial. Actualmente, esta técnica se está utilizando en el gran escorial de cromo de Wattrelos (59), en una amplia zona industrial en desuso en fase de rehabilitación, para eliminar la contaminación por cromo hexavalente. Debido a las drásticas condiciones que presenta el emplazamiento, el procedimiento se sometió en primer lugar a un test en laboratorio y sobre el terreno antes de su implementación industrial. □

UN SYSTÈME FRANÇAIS POUR LA GESTION DES INFRASTRUCTURES SERBES

AUTEUR : ALEXANDRE CHAPERON, DIRECTION DU DÉVELOPPEMENT, ADVITAM

AVEC UN PATRIMOINE GLOBAL DE 2 900 OUVRAGES D'ART, DONT PLUS DE 40 % EN MAUVAIS ÉTAT, LA DIRECTION NATIONALE DES ROUTES SERBES (PUTEVI SRBIJE) A SOUHAITÉ SE DOTER D'UN SYSTÈME D'INFORMATION POUR MIEUX APPRÉHENDER LE PASSAGE À UNE GESTION PRÉVENTIVE DE SES INFRASTRUCTURES. CE SYSTÈME D'INFORMATION, QUI PERMETTRA À TERME DE SURVEILLER ET DE MAINTENIR LE RÉSEAU, S'INSCRIT DANS LE CADRE D'UNE STRATÉGIE D'ADHÉSION À L'EUROPE, ET D'UN ACCORD ADMINISTRATIF FRANCO-SERBE. LE PROJET A ÉTÉ CONFÉ PAR LES AUTORITÉS SERBES AU GROUPE ADVITAM, SPÉCIALISTE DE L'INSPECTION, DU MONITORING ET DE LA GESTION DES INFRASTRUCTURES.

© ADVITAM

1



Afin de répondre à cette demande, Advitam a adapté son système de surveillance et de gestion des infrastructures

ScanPrint® aux méthodes et réglementations nationales serbes, avec les objectifs suivants :

→ Maîtriser la gestion du patrimoine national, et son évolution progressive vers une politique de maintenance et d'entretien préventifs ;

→ Prioriser les actions sur le réseau, et justifier les investissements au regard

des politiques de sécurité des usagers, d'optimisation des coûts à long terme et de mise aux normes européennes.

VERS LA MAÎTRISE DE LA GESTION DU PATRIMOINE ET LA POLITIQUE DE MAINTENANCE PRÉVENTIVE

La première étape du projet a été de mettre à jour le référentiel informatique national pour le suivi et la gestion des infrastructures, au travers d'un manuel d'inventaire et d'un plan de surveillance

**1- Pont Titel,
sur la rivière
Tisa, Serbie.**

**1- Titel Bridge,
over the Tisa
River, Serbia.**

et d'entretien cohérents sur l'ensemble du réseau.

Le groupe Advitam a par le passé déjà conçu, ou mis à jour, des manuels d'inventaires et d'inspection de grands patrimoines, tels que le patrimoine bulgare ou celui de la ville de New York. Il a également l'expérience de manuels nationaux, tels que l'IQOA⁽¹⁾, en France. Les manuels d'inventaire et d'inspection serbes ont été mis à jour en tenant compte de cette expérience, des particularités propres au réseau serbe, ▷

et de la politique générale (des objectifs) de gestion, comme la mise aux normes des ouvrages présents sur les corridors européens.

LE MANUEL D'INVENTAIRE

Le manuel d'inventaire a pour objectif de décrire l'ensemble des informations nécessaires à la connaissance et à la gestion de chaque ouvrage (figure 2), en fonction de son type (pont, buse, mur, tunnel...). Ces informations incluent :

→ **Les données générales** de l'ouvrage : son identifiant et son nom, sa situation (type de voie portée et franchie), sa localisation...

→ **Les données disponibles sur sa conception** : dimensions, matériaux, types d'équipements...

→ **Les données disponibles sur sa construction** : date, constructeur...

→ **Les données nécessaires à son exploitation** : mode de gestion, dernières activités sur l'ouvrage.

→ **Les documents liés**, organisés par type : plans, notes de calculs, contrats, documents divers.

→ **Un dossier photo**, généralement constitué d'une part de prises de vues normalisées : vue amont, vue aval, vue du tablier... ainsi que de ses désordres principaux.

LES MANUELS D'INSPECTION ET DE MAINTENANCE

Quant aux **manuels d'inspection**, ils ont pour objectif de codifier, sous forme de QCM par exemple, les relevés effectués pendant les inspections. Aux niveaux national et départemental, cette codification permet d'obtenir des données comparables d'une année sur l'autre, et d'un ouvrage sur l'autre, indépendamment de la personne qui réalise l'inspection (figure 3).

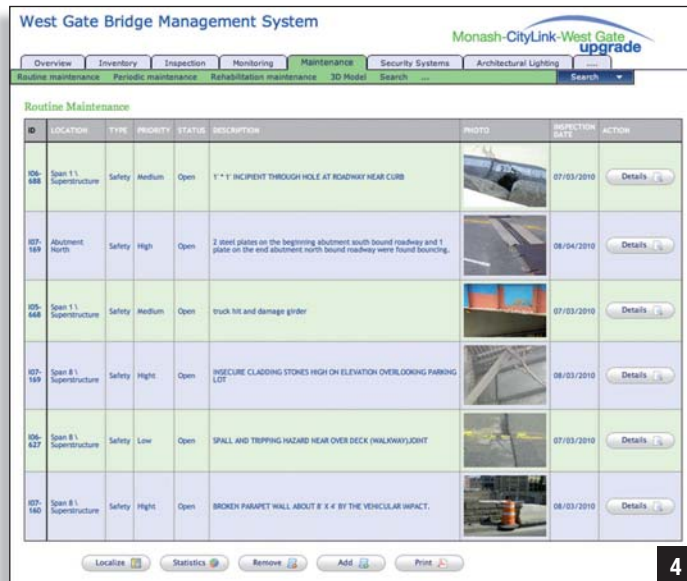
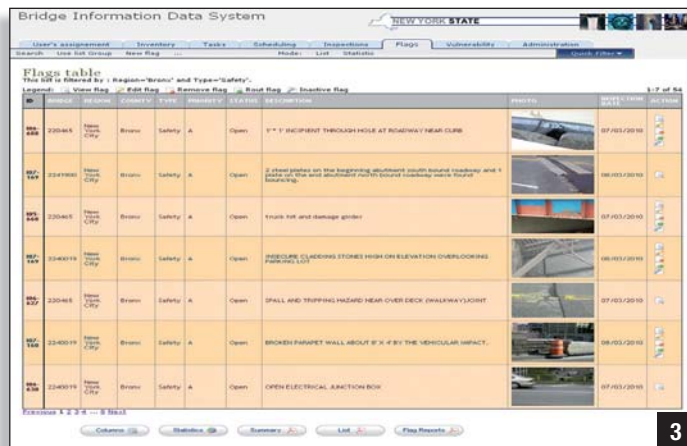
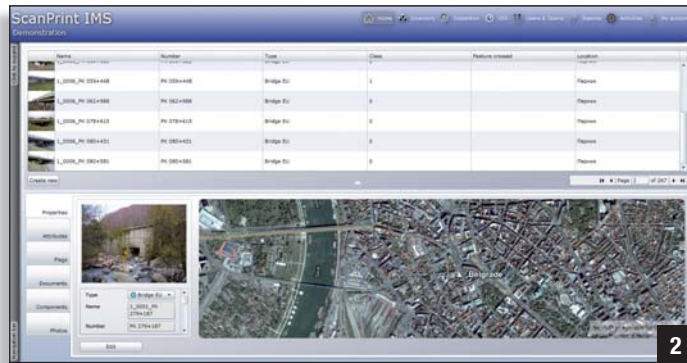
Dès le début du projet, les fréquences d'inspection sont définies par type de structure pour établir une rotation sur le patrimoine national. Les inspections de routine ont pour objectif :

→ Le déclenchement des actions d'entretien courant sur les ouvrages (nettoyage des joints d'expansion, de la végétation, réparations des garde-corps...), et l'établissement de bordereaux quantitatifs ;

→ Le déclenchement d'actions immédiates en cas de désordre impactant la sécurité des usagers ;

→ Le classement des ouvrages selon des critères de notation simples et comparables ;

→ Le déclenchement d'inspections détaillées en cas de désordre potentiel-



2- Vue générale du manuel d'inventaire dans ScanPrint®. Les ouvrages sont référencés par leur position géographique.

3- Relevés de désordres codifiés dans ScanPrint®. Les relevés sont effectués en Anglais pour faciliter les échanges franco-serbes. L'application finale existe en une vingtaine de langues et sera transmise en Serbe.

4- Liste d'actions de maintenance.

2- General view of the inventory manual in ScanPrint®. The structures are referenced by their geographic location.

3- Damage readings coded in ScanPrint®. The readings are in English to facilitate Franco-Serbian communications. The final application is available in about twenty languages and will be transmitted in Serbian.

4- List of maintenance actions.

lement grave ou d'un classement défavorable de l'ouvrage. Les inspections détaillées doivent permettre d'obtenir un relevé d'informations suffisant pour établir et programmer des avant-projets de maintenance.

Une liste type d'actions d'entretien et de maintenance a été établie par Advitam et Putevi Srbije. Cette expérience combinée a permis d'élaborer, dès le début, des listes d'actions complètes. L'expérience globale d'Advitam en surveillance et contrôle d'ouvrages a permis de compléter cette liste.

Les actions sont réparties en plusieurs catégories :

→ Les actions d'entretien courant, issues des inspections de routine et des inspections détaillées ;

→ Les actions de surveillance renforcée (inspections exceptionnelles, instrumentations, contrôle et investigations) issues des inspections de routine et des inspections détaillées ;

→ Les projets de réparation, issues des inspections détaillées.

Pour les actions simples, un coût unitaire est directement associé dans la base

de données. Pour les actions plus complexes, nécessitant l'intervention de plusieurs entreprises, de moyens d'accès particuliers, ou encore une mutualisation des réparations (par exemple une campagne de remplacement d'appareils d'appui), il sera possible de renseigner de façon manuelle le coût de l'intervention (figure 4).

Enfin, un système de notation des ouvrages, basé sur une notation de chaque désordre enregistré, est défini. Rapporté à l'ouvrage, ce système permet de tenir compte, *in fine*, à la fois de



© ADVITAM

l'état de l'ouvrage et de son importance sur le réseau. Ce système a pour objectif de classer les ouvrages, et d'alerter Putevi Srbije sur les problèmes à traiter en retour d'inspection, et de fournir un indicateur pour la priorisation et la programmation pluriannuelle des actions sur le réseau.

VERS LA MISE EN PLACE DE LA BASE DE DONNÉES ET LA PRIORISATION DES ACTIONS

Parallèlement à l'établissement du référentiel, un paramétrage global de l'application a été opéré : modification de l'apparence générale : couleurs, logos..., le paramétrage des manuels d'inventaire et d'inspection, la modification des flux de validation des données : validation des données d'inspection, des rapports d'inspection, des actions d'entretien ou de maintenance... et le format des rapports automatiques :

fiches signalétiques, dossiers d'ouvrage complets, rapports photo, rapports d'inspection de routine, rapports d'inspection principale, bordereaux d'entretien (photos 5 et 6).

La mise en place de la base de données est alors réalisée selon deux axes :
 → La récupération des informations disponibles dans les bases existantes et les archives de Putevi Srbije ;
 → La réalisation d'un audit d'une centaine d'ouvrages courants, et de deux ouvrages exceptionnels, par des bureaux d'études serbes, équipés d'une tablette d'inspection portable fournie par Advitam.

AUDIT ET RÉCUPÉRATION DE DONNÉES SUR LE TERRAIN

La récupération des informations disponibles dans les bases existantes (format Excel) a été faite par la mise en place d'une passerelle informatique. Les archives seront scannées et intégrées

5 & 6- Inspections sur tablette.
7- Inspection d'un tunnel avec ScanPrint®.
8- Un exemple de rapport automatique sur un ouvrage exceptionnel.

5 & 6- Inspections on tablet PC.
7- Inspection of a tunnel with ScanPrint®.
8- An example of an automatic report on an exceptional structure.

au fil de l'eau par Putevi Srbije, grâce au module de gestion documentaire. Pendant l'audit, les inspections sont réalisées en même temps que la récupération des informations d'inventaire. Directement fonctionnelle, l'application permet de visualiser en temps réel l'avancement de l'audit : le géoréférencement de l'ouvrage sur le SIG, l'intégration de prises de vues normalisées et du dossier photo de chaque ouvrage, les données d'inventaire complémentaires, les données d'inspection. Les tablettes (photo 7), qui constituent un environnement d'inspection complet (saisie des désordres, commentaires, photos), possèdent par ailleurs les avantages suivants :
 → Pas de relevé sur papier, donc pas de perte d'information, pas de ressaisie au bureau ;
 → Les données d'inspection sont directement enregistrées et organisées en base de données.

© ADVITAM

ID	Title	Element	Preparation type	Photo
F001004	320 Footpath defect	Deck Extrados TP/F1	Physically repaired	
F001005	320 Footpath defect	Deck Extrados TP/F1	Physically repaired	
04A001	320 Drainage system defect	Deck Extrados P5/F7	Physically repaired	
F001001	320 Footpath defect	Deck Extrados P4/F5	Physically repaired	

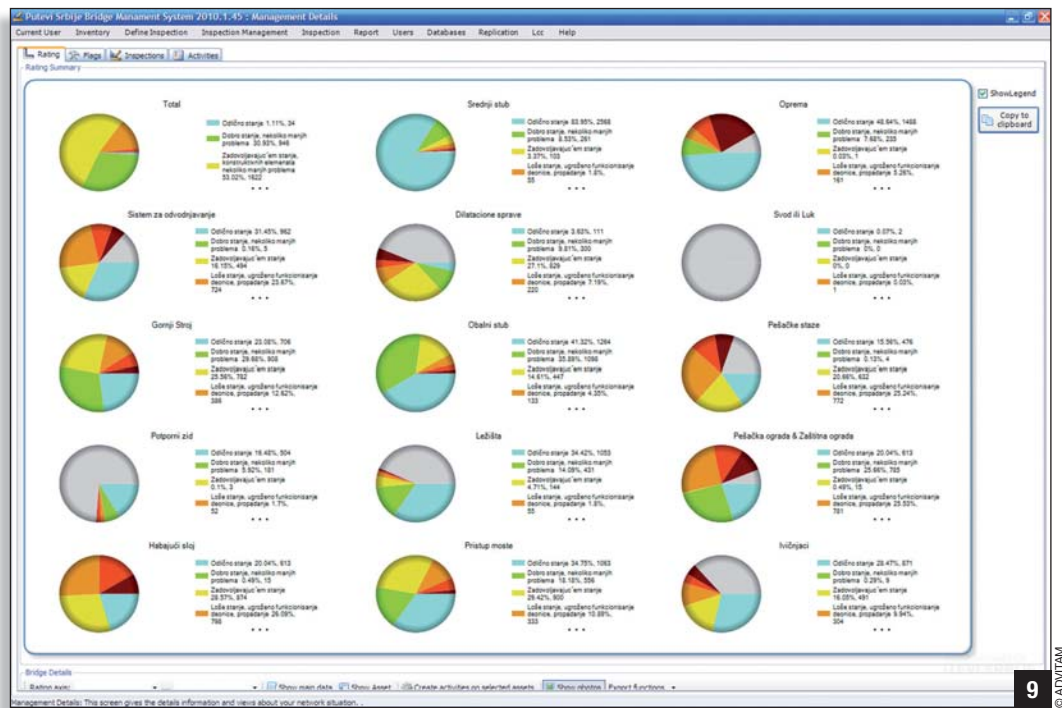
Les données d'inventaires, peu évolutives, sont traitées de manière statique. En revanche, ScanPrint® permet de sauvegarder année après année l'ensemble des données relatives à chaque dégradation, ce qui permettra à l'Agence d'observer l'évolution de son patrimoine, et de l'analyser pour améliorer ses campagnes de maintenance. Les ouvrages exceptionnels, nécessitant des inspections spécifiques, sont traités différemment des ouvrages courants. À cet effet, un transfert de technologie sur la définition des points de contrôle des ouvrages exceptionnels, basés sur une analyse des risques liés à leur vieillissement, a été réalisé. Ensuite, des plans d'inspection détaillés sont intégrés à l'application terrain, ce qui permet d'effectuer un relevé de dégradations précis (photo 8).

ANALYSE DES DONNÉES D'INSPECTION

En retour d'audit, la base de données (photo 9) comporte, pour chaque ouvrage, les informations suivantes :

- L'ensemble des résultats d'inspection ;
- Les bordereaux d'entretien et les recommandations de réparation associées ;
- Le classement des ouvrages et des actions par ordre de priorité ;
- Le coût des actions, lorsque le système est renseigné.

ScanPrint® est alors utilisé pour proposer à l'Agence un plan d'intervention pertinent, étalé sur plusieurs années. Les critères pour la planification des interventions sont, d'une part l'urgence de la réparation, qui tient compte du critère de priorité global de l'ouvrage et de l'impact sur la sécurité des usagers, et d'autre part le budget annuel ou mensuel alloué, d'une part, à l'entretien



9- Statistiques complètes sur les relevés de désordre de 100 ouvrages. Ces informations sont utilisées pour préparer des campagnes de maintenance optimisées.

9- Complete statistics of the damage readings for 100 structures. This information is used to prepare optimised maintenance campaigns.

courant du patrimoine, et d'autre part, aux travaux de réparation ou de renforcement.

Une fois le plan d'intervention établi, celui-ci est intégré à la base de données pour être piloté par les utilisateurs de l'application.

Les fréquences d'inspection par ouvrage sont quand à elles mises à jour, pour mettre en place le cycle de surveillance/maintenance préventive attendu.

En fin de projet, l'Agence Nationale des Routes Serbes aura à sa disposition un système de bases de données complet, lui permettant de s'orienter vers une gestion préventive des ouvrages de son réseau, de remonter à l'Agence centrale les informations critiques, et de justifier ses investissements.

Advitam continuera à intervenir périodiquement, pour des prestations d'assistance technique et d'évolution de l'application. □

(1) IQQA : Image qualité des ouvrages d'art.

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- L'Agence nationale des routes serbes
- Groupe Advitam
- Le ministère français de l'Économie

DURÉE TOTALE DU PROJET : 1 an

ABSTRACT

A FRENCH SYSTEM FOR SERBIAN INFRASTRUCTURE MANAGEMENT

ALEXANDRE CHAPERON, ADVITAM

With a total legacy of 2900 engineering structures, of which more than 40% are in poor condition, the Serbian National Roads Department (PUTEVI SRBIJE) wanted to have an information system to better approach the transition to preventive management of its infrastructure, within the framework of its EU accession policy. This information system, which will ultimately allow supervision and maintenance of the network, comes within the framework of an EU accession strategy and a Franco-Serbian administrative agreement. The project was awarded by the Serbian authorities to the Advitam group, a specialist in infrastructure inspection, monitoring and management. □

UN SISTEMA FRANCÉS PARA LA GESTIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS SERBIAS

ALEXANDRE CHAPERON, ADVITAM

Con un patrimonio global de 2.900 estructuras, de las que más de 40% se encontraban en mal estado, la Dirección nacional de carreteras serbias (PUTEVI SRBIJE) ha decidido dotarse de un sistema de información para comprender mejor el paso a una gestión preventiva de sus infraestructuras, en el marco de su política de adhesión a Europa. Este sistema de información, que permitirá a corto plazo vigilar y mantener la red, se inscribe en el marco de una estrategia de adhesión a Europa y de un acuerdo administrativo franco-serbio. Las autoridades serbias han confiado el proyecto al grupo Advitam, especialista en la inspección, el monitoring y la gestión de infraestructuras. □

MUSÉE DU LOUVRE : CRÉATION DES ESPACES MUSÉOGRAPHIQUES ET TECHNIQUES DES ARTS DE L'ISLAM

AUTEURS : MARC BENGIO, ROMAIN BRIEU, NICOLAS UTTER - SOLÉTANCHE BACHY,
RUEIL-MALMAISON, FRANCE

LA CONSTRUCTION DU NOUVEAU DÉPARTEMENT DES ARTS DE L'ISLAM AU MUSÉE DU LOUVRE NÉCESSITE LA CRÉATION D'UNE INFRASTRUCTURE À L'APLOMB DES FAÇADES DU LOUVRE. PRÉALABLEMENT À CE TERRASSEMENT POUVANT ATTEINDRE 12 MÈTRES, LA REPRISE EN SOUS-ŒUVRE DES BÂTIMENTS EXISTANTS EST EXÉCUTÉE PAR JET-GROUTING, COMPLÉTÉ PAR UNE INJECTION. LE SOUTÈNEMENT EST CONSTITUÉ DE BÉTON PROJETÉ, ASSOCIÉ À LA MISE EN ŒUVRE DE TIRANTS D'ANCRAGES PRÉCONTRAINTS ET DE CLOUS. UNE DOUBLE APPROCHE DE CALCUL, À LA RUPTURE ET AUX ÉLÉMENTS FINIS, A ÉTÉ NÉCESSAIRE POUR DÉTERMINER LES CONFORTEMENTS À METTRE EN ŒUVRE ET LE PHASAGE DES TRAVAUX.

Avec 18 000 œuvres, le musée du Louvre possède l'une des collections les plus importantes au monde dans le domaine des Arts de l'Islam.

Afin de pouvoir exposer ce trésor au sein du musée du Louvre, les nouveaux espaces du département des Arts de l'Islam se développeront sur 6 450 m². Ce projet d'envergure, conçu par les architectes Rudy Ricciotti et Mario Bellini, est un véritable défi architectural car il doit s'intégrer sans violence dans la cour Visconti qui, jusqu'à ce jour, n'était pas accessible au public. Le projet s'étend également dans l'aile Daru. Il multipliera par quatre la surface d'exposition tout en respectant le parcours muséographique. Les nouveaux espaces seront recouverts par un voile lumineux discrètement diffusant, flottant délicatement sur la muséographie (photo 2).

Le principe conducteur du projet est donc d'intégrer cet espace supplémentaire dans le site du Louvre sans en altérer la beauté. Par conséquent,

il ne s'agit pas de créer un édifice en superstructure, mais au contraire d'enterrer l'ouvrage pour préserver la vue sur l'extérieur qui sera offerte aux visiteurs depuis les salles d'exposition. Pour intégrer le projet, il est prévu de terrasser la cour Visconti sur 12 m de profondeur, la galerie Daru sur 8 m et de construire en remontant un niveau technique, un parterre, une mezzanine et un rez-de-cour.

Dans cette opération, Soletanche Bachy intervient pour conduire les études et réaliser les reprises en sous œuvre et les soutènements, en groupement avec la société Lainé Delau qui construira le Gros Œuvre.

Les travaux comprennent pour l'essentiel : des travaux préparatoires de protections de l'existant, les travaux de création des sorties de secours, des ouvrages d'assainissement, les reprises en sous-œuvre des bâtiments et des ouvrages existants, le terrassement et le soutènement des fouilles, le gros œuvre des futurs espaces muséographiques.

LA REPRISE EN SOUS-ŒUVRE

Les travaux de reprise en sous-œuvre s'articulent principalement autour des techniques du jet-grouting et de l'injection.

Quatre cent colonnes de jet-grouting (figure 3) réalisées en jet simple de 1,40 m à 1,60 m de diamètre viennent reporter les charges verticales des façades sur les marnes et caillasses et le calcaire grossier situés entre 6,00 et 8,00 m de profondeur.

L'étanchéité de la fouille est assurée par le rideau des colonnes de jet au droit des alluvions, prolongé par une jupe injectée à 18 m de profondeur dans le calcaire. 200 forages injectés au coulis de bentonite ciment constituent cette jupe.

Compte tenu de la géométrie complexe du projet, et pour s'assurer de la bonne jonction des colonnes (notamment dans les angles de la fouille) ainsi que de la bonne fermeture du voile injecté, les plans de tir des forages ont été mis au point à partir d'une étude en trois dimensions (figures 4 et 5).

TERRASSEMENTS, BÉTON PROJETÉ, ANCRAGES

Les soutènements provisoires sont des voiles en béton projeté, réalisés par passes descendantes de 1,30 m dans les alluvions et de 1,50 m dans le rocher. Ils occupent une surface totale de 3 700 m². Ces voiles de 0,20 m d'épaisseur sont retenus en tête par 150 tirants précontraints de 600 à 900 kN et par 850 clous répartis sur toute la hauteur terrassée.

Dans les zones recevant peu de charges verticales, le radier définitif est ancré par des micropieux pour assurer la stabilité à la sous-pression de la nappe.

REPRISE DES POTEAUX AILE DARU

Dans l'aile Daru, le terrassement est réalisé sous les poteaux. Des poutres moisantes reportant les charges sur les fondations des façades sont coulées au préalable. Les appuis sont renforcés avec des micropieux. Les poutres sont ensuite vérinées (photos 6a, 6b et 6c).



1
© LUC BENEVELLO-PHOTOOTHÈQUE VINCI



UN ENVIRONNEMENT SENSIBLE

Il s'agit d'un chantier très délicat, dans l'un des plus beaux musées du monde, avec des façades ou ouvrages existants classés monuments historiques.

Les travaux se déroulent dans l'aille Denon qui est la partie la plus visitée (95 % des visites) du Louvre en raison de la présence de la Joconde (au deuxième étage de l'aille du Manège), du célèbre tableau de David « Le sacre de Napoléon » (au deuxième étage de l'aille Daru) et de la Vénus de Milo. Cette partie du Louvre reste en activité pendant les travaux. Dans ce contexte, le moindre mouvement de l'existant pendant les travaux, doit être non seulement surveillé mais faire l'objet d'actions correctives immédiates pour ne pas dépasser les tolérances fixées au contrat.

SolData équipé plus d'une centaine de cibles, scrutées 24 heures sur 24 par 2 théodolites motorisés « Cyclops », informant en temps réel des moindres mouvements des façades de la cour Visconti et de l'intérieur de l'aille Daru

1- Travaux en cours.

2- Aménagement futur.

1- Work in progress.

2- Future development.



avec une précision de 0,5 mm à 60 m de distance.

NATURE DU SOUS-SOL

Les travaux sont réalisés depuis le niveau du dallage situé à 31,20 NGF. Les différentes campagnes de sol et notamment les campagnes de sondages complémentaires exécutées par Arcadis en 2006 et 2007, montrent le toit du substratum rocheux constitué par les calcaires du Lutétien peu variable.

Les alluvions anciennes recouvrent le massif calcaire plus ou moins marneux en tête. Les sables de l'Yprésien situés vers la cote 8,00 NGF s'étendent largement en dessous du fond de fouille du projet.

Au droit de la cour Visconti, se succèdent depuis la surface, les remblais sur 3,00 m maximum d'épaisseur, les alluvions anciennes de 3,00 à 5,00 m d'épaisseur, les marnes et caillasses peu épaisses puis le calcaire grossier.

Le toit du substratum évolue entre 24,65 et 25,30 NGF.

Les caractéristiques mécaniques sont déduites des essais pressiométriques principalement issus des dernières campagnes de reconnaissance.

Les moyennes arithmétiques des caractéristiques (Module pressiométrique E & Pression limite PI) sont reportées dans le Tableau 1 selon la campagne d'exécution.

La nappe phréatique des alluvions est fortement alimentée par la Seine en période de crue.

En période normale elle baigne tout juste les alluvions.

Elle est très influencée par les pompages du Louvre.

Les niveaux de nappe retenus dans ce projet figurent au Tableau 2.

Les sondages de reconnaissance dans les maçonneries montrent des fondations proches de la surface (figure 7).

Les piliers de façade sont posés sur un gros béton filant. Les niveaux d'assise des fondations sont récapitulés au Tableau 3.

DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DES OUVRAGES

Le jet-grouting

Les colonnes de jet sont implantées sous les murs périphériques de la fouille. Ces colonnes descendent dans les marnes et caillasses et permettent de reporter les charges verticales sur le substratum en limitant leur influence sur les soutènements.

Dans les alluvions, l'aspect massif recherché sera en général effectif du fait du recouplement des colonnes entre elles. La résistance à la compression moyenne, prise en compte pour définir les paramètres de cisaillement du jet, est de 3 MPa. La résistance à la compression du coulis prélevé dans les colonnes de jet est au moins égale à 6 MPa.

Dans la zone marneuse (marnes et caillasses) trop résistante pour espérer créer des colonnes de diamètre constant, l'amélioration est obtenue grâce à l'action du jet dans les fissures

et les zones de remplissage argileux. Les zones d'ombre non traitées par le jet sous les gros piliers sont traitées par injection de coulis de ciment de manière à homogénéiser le massif de reprise.

Le taux de travail à la base des piliers varie entre 0,5 et 1 MPa. Le massif de jet agit en répartissant les charges entre deux piliers. En tenant compte de cette répartition, des poids propres et de l'incidence des diverses réactions (tirants d'ancrage, etc.), les contraintes maximales dans le massif de jet n'excèdent pas 1,2 MPa.

Les soutènements

La stabilité des voiles en béton projeté est assurée grâce à un lit de tirants précontraints situé vers la cote 30,00 NGF non loin de la base des fondations (figure 8).

Les tirants précontraints ont pour but de limiter les déplacements en tête du massif de jet soumis à la poussée des terres, et la poussée induite par les piliers de façade. Ils s'appuient sur des

liernes métalliques plaquées contre les fondations. La puissance de précontrainte nécessaire est variable en fonction des charges et de la profondeur de la fouille. Les soutènements sont stabilisés ensuite par des niveaux de clous d'ancrage constitués par des barres en acier haute adhérence scellés dans le terrain par Injection Globale et Unitaire. Les tirants actifs sont constitués de torons type T15,7 de 150 mm² de section (classe 1880 MPa limite élas-

tique 248 kN). Les tirants, provisoires, travaillent à 0,75 fois la limite élastique. Les clous sont constitués par des barres en acier de limite élastique 500 MPa filettées. Les diamètres utilisés sont 25, 32, 40 et 50 mm.

Les têtes de clous sont noyées dans le voile en béton projeté qui comporte 2 lits de treillis soudés.

Un dispositif drainant est prévu entre le parement terrassé et le béton projeté dans les zones baignées par la nappe phréatique.

Les piliers entre la cour Visconti et l'aile Daru sont habillés par un voile en béton projeté et armés de barres horizontales de type Dywidag.

Le voile d'injection

Ce voile mono-linaire a pour but de limiter les venues d'eau par le massif calcaire, en traitant les zones de forte fissuration. Il descend 5,00 m sous le fond de fouille. Il est réalisé dans le prolongement des colonnes de jet, qui assurent elles aussi un rôle d'étanchéité.

3- Vue en plan.

4- Modèle en trois dimensions.

5- Coupe du projet.

3- Plan view.

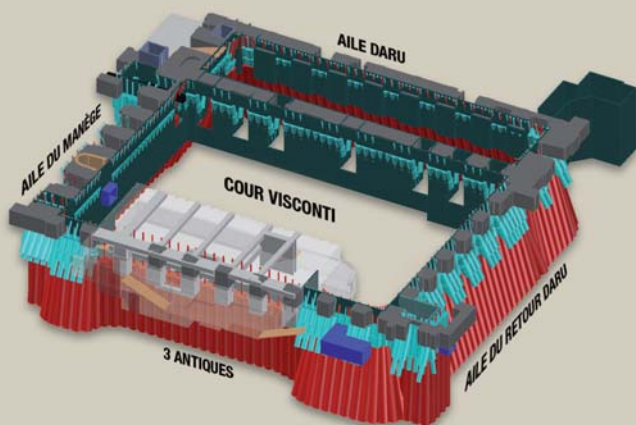
4- Three-dimensional model.

5- Cross section of the project.

PHASAGE DES TRAVAUX

- Réalisation des colonnes de jet-grouting.
- Mise en œuvre du voile injecté dans le prolongement des colonnes de jet.
- Traitement complémentaire par injection au droit des fondations.
- Travaux d'enserrement des poteaux mis à nus (barres et béton projeté) au fur et à mesure des terrassements.
- Terrassement vers la base des fondations maçonnées.
- Confection des liernes métalliques pour tirants.
- Réalisation des tirants d'ancrage précontraints appuyés sur liernes.
- Terrassement par phase jusqu'au fond de fouille.
- Réalisation des clous par phase.
- Mise en œuvre du béton projeté par phase.
- Réalisation des micropieux de radier.

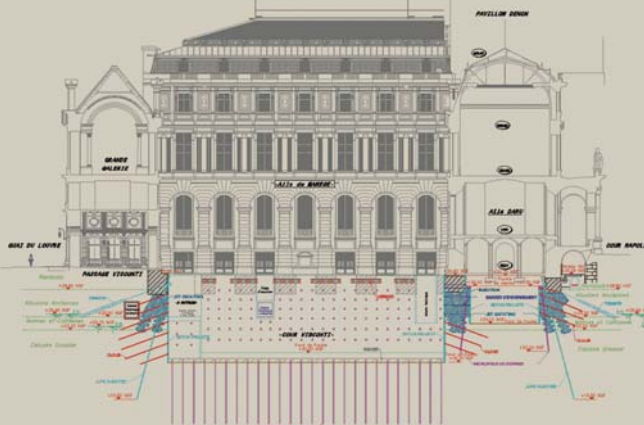
MODÈLE EN TROIS DIMENSIONS



VUE EN PLAN



COUPE DU PROJET





6a

© DR



6b



6c

Les micropieux de radier

Les radiers à stabiliser sont scellés dans le calcaire.

Les sous-pressions importantes et le manque de poids de la structure justifient la nécessité d'accrocher les radiers à des micropieux assurant le rôle de tirants passifs.

La tête de micropieu est noyée dans le radier. Le nombre de micropieux, disposés selon une maille carrée, est limité par le marché à 6 unités par 100 m² pour limiter au maximum la traversée de l'étanchéité.

6a, b & c- Aile Daru - reprise des poteaux.

6a, b & c- Daru wing-underpinning the columns.

JUSTIFICATION DE LA STABILITÉ À LA RUPTURE SUR TALREN

Les calculs sont conduits à l'aide du programme Talren (figure 9) mis au point par la société Terrasol.

Le programme calcule, pour des surfaces de ruptures imposées, le coefficient de sécurité minimum associé à la

combinaison choisie. La combinaison respecte les règles de Clouterre selon la méthode des coefficients partiels.

La justification est effectuée aux ELU en recherchant les caractéristiques géométriques et résistantes des renforcements produisant un coefficient de sécurité minimum de 1.

La méthode Bishop avec les paramètres pondérés de Clouterre en combinaison fondamentale courante a été retenue.

Les surfaces de glissement étudiées sont planes pour respecter la nature des matériaux affectés.

Dans le rocher ou le jet, les ruptures ne sont pas circulaires.

Au fur et à mesure des terrassements, les renforcements (tirants et clous) sont activés. Les piliers de façade sont modélisés par des charges verticales uniformes.

Le jet-grouting est modélisé par un massif de sol aux caractéristiques mécaniques déduites de la résistance à la compression.

Le toit de la frange marseuse améliorée par le jet est également modélisé ainsi que la nappe phréatique. ▷

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES RETENUES

Couches	E MPa	PI MPa	α
Remblais	2	0,2	0,50
Alluvions	50	2,5	0,33
Frange marseuse	20	1,5	0,50
Calcaire grossier	150	5	0,50

TABLEAU 2 : NIVEAUX DE NAPPE PHRÉATIQUE

Situation	Nappe basses eaux	Nappe hautes eaux	Nappe eaux exceptionnelles	Nappe calcul en service
Daru Visconti	23,70	25,40	26,30	26,80
Visconti	23,70	26,10	27,20	27,70
3 Antiques	23,70	26,80	28,10	28,60

TABLEAU 3 : NIVEAUX D'ASSISE DES FONDATIONS

Façade	Base des pierres	Base du gros béton
3 Antiques	28,50	28,00
Aile du Manège	30,00	28,00
Aile Daru	30,00	28,00
Aile Retour Daru	30,00	28,00

TABLEAU 4 : CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS PRISES EN COMPTE DANS LES CALCULS

Couches	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	Φ [°]	C [kPa]
Remblais	18	10	30	0
Gros béton	21	11	38	30
Alluvions	20	11	35	0
Jet-grouting	22	12	33	400
Frange Marseuse	21	11	25	50
Frange marseuse améliorée par le jet	22	12	35	200
Calcaire	21	11	35	200

TABLEAU 5 : MODULES DE DÉFORMATIONS

Couches	E ₅₀ (MPa)	E _{ur} (MPa)
Remblai	8	16
Alluvions	300	600
Frange altérée	80	160
Calcaire	600	1200
Jet	900	1800
Frange améliorée	400	800

TABLEAU 6 : DÉFORMÉES THÉORIQUES AILE DU MANÈGE

Type de déformation	Cas N°1	Cas N°2	Cas N°3
Tassement en surface	11 mm	8 mm	7 mm
Déplacement horizontal	8 mm	7 mm	6 mm

TABLEAU 7 : DONNÉES GÉOTECHNIQUES AILE DU MANÈGE

Couches	PI. MPa	E MPa
Alluvions	4	90
Calcaire grossier	5	500

TABLEAU 8 : CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES MESURÉES DU JET-GROUTING

Rc (MPa)	E (MPa)	E/Rc	Sol
10,2	16602	1628	alluvions
10,6	11236	1060	alluvions
5,6	4865	869	marno-calcaire
9,1	12143	1334	alluvions

Pour chaque surface de rupture étudiée, sont calculés les efforts dans les tirants et clous. Les efforts maximaux servent à dimensionner le voile en béton projeté.

Les caractéristiques mécaniques des renforcements et les taux de frottement limites des scellements issus des essais préalables sont des données de calcul.

APPROCHE DES DÉFORMATIONS SUR PLAXIS 2D

L'approche des déformations du sol sous les fondations et du soutènement en béton projeté cloué est conduite au droit de l'Aile du manège la plus chargée à l'aide du programme Plaxis D2.

Le modèle de comportement retenu est le modèle de sol avec écouvissage (Hardening Soil Model). Il est construit avec les paramètres de rigidité indiqués au Tableau 5.

Toutes les phases de travaux sont prises en compte, depuis la construction du Louvre. L'approche des déformations est étudiée en faisant varier les caractéristiques du jet et de la frange marnieuse améliorée.

Trois combinaisons ont été étudiées (figure 10) :

- Jet $E_{50} = 900$ MPa ;
Frange améliorée = 80 MPa.
- Jet $E_{50} = 1\ 800$ MPa ;
Frange améliorée = 600 MPa.
- Jet $E_{50} = 900$ MPa ;
Frange améliorée = 200 MPa.

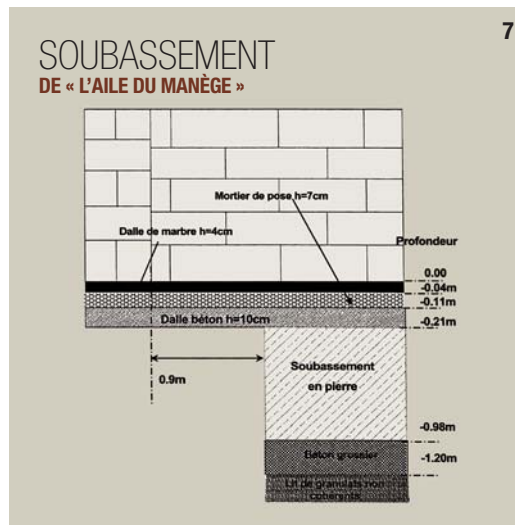
Le champ de répartition des contraintes montre que le massif de jet reste entièrement comprimé et que des effets voûtes se développent (figure 11).

La contrainte maximale est de 820 kPa (diagramme selon une coupe verticale située à l'aplomb de la façade). Cette valeur est à comparer à la résistance à la compression des colonnes de jet. Le coefficient de sécurité est égal à 7,3. Dans l'axe du pilier de façade, on peut supposer une concentration des contraintes dont la valeur serait au maximum 1 180 kPa. Dans ce cas, le coefficient de sécurité est proche de 5. L'étude de l'évolution du tassement au droit de la façade (figure 12) ainsi que de la déformation horizontale (figure 13) en fonction des phases de terrassement a permis de valider le principe de confortement retenu.

L'approche PLAXIS 2D a permis d'obtenir un ordre de grandeur des déformations variant de 5 à 10 mm.

SUivi GÉOTECHNIQUE

L'exploitation des mesures effectuées au cours des travaux a permis de mener une rétro-analyse.



Les résultats de l'analyse effectuée sur la zone de l'Aile du manège sont présentés au Tableau 6.

Les déformations attendues au droit du pilier de façade étaient, en fonction des hypothèses faites sur le module d'Young du jet-grouting, et de la frange améliorée (cf. supra).

Les déformées constatées sont de l'ordre de 2 millimètres.

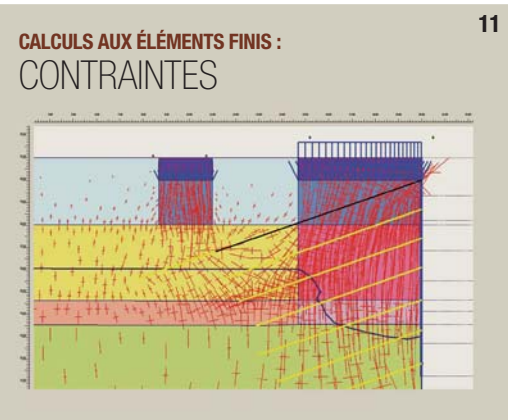
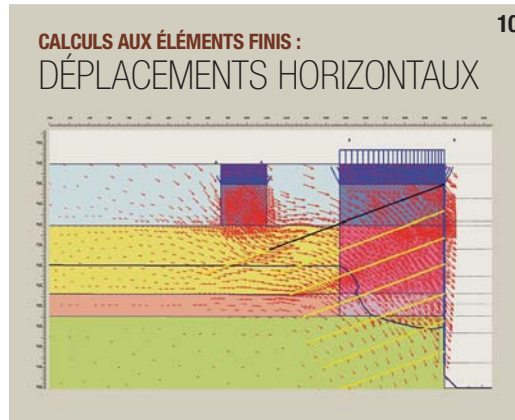
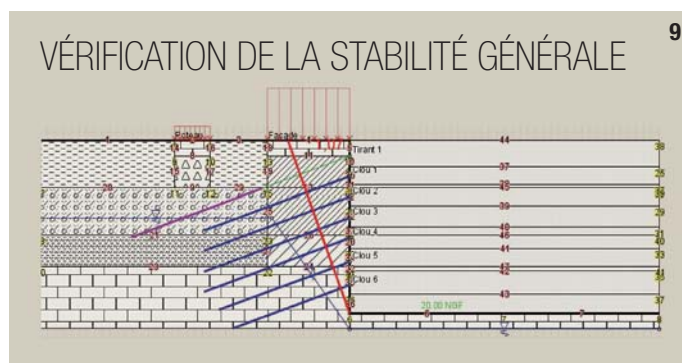
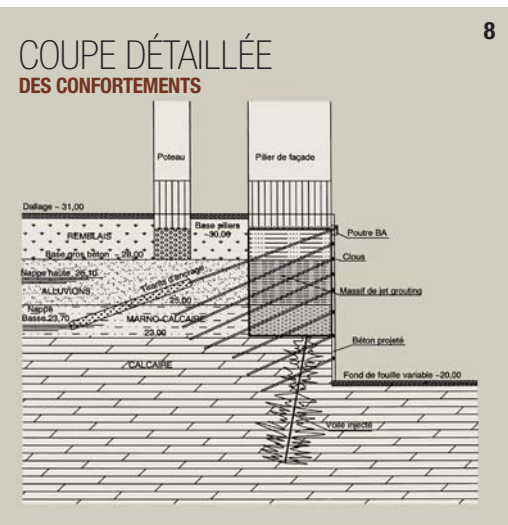
La première étape du recalage consiste à retenir, pour l'analyse, le sondage le plus proche (PR2).

Sur la base de ce sondage, les valeurs figurant au Tableau 7 ont été retenues. À noter que la frange altérée n'est

pas perceptible dans le sondage PR2. En ce qui concerne le jet-grouting, nous disposons de 360 essais de compression à 28 jours et 3 essais de mesure du module de déformation sécant.

Nous retenons :

- Pour le jet-grouting dans les alluvions :
 $R_c = 10$ MPa,
 $E/R_c = 1\ 000$,
Esécant = 10 000 MPa.
- Pour le jet-grouting dans la frange marnieuse :
 $R_c = 5$ MPa,
 $E/R_c = 1\ 000$,
Esécant = 5 000 MPa.



7- Soubassement de « l'aile du manège ».

8- Coupe détaillée des confortements.

9- Vérification de la stabilité générale.

10- Calculs aux éléments finis : déplacements horizontaux.

11- Calculs aux éléments finis : contraintes.

7- Basement of the «Aile du manège» wing.

8- Detailed cross section of consolidation.

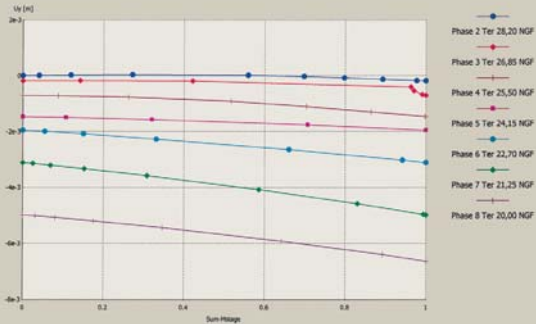
9- Check on overall stability.

10- Finite-element calculations: horizontal displacement.

11- Finite-element calculations: stresses.

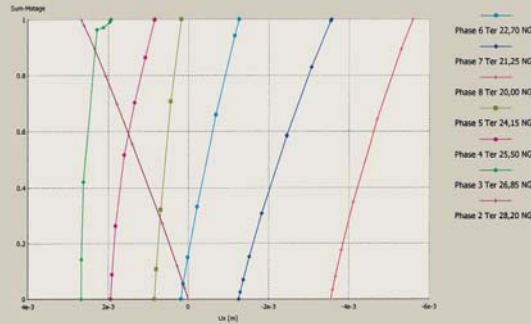
ÉVOLUTION DU TASSEMENT THÉORIQUE

12



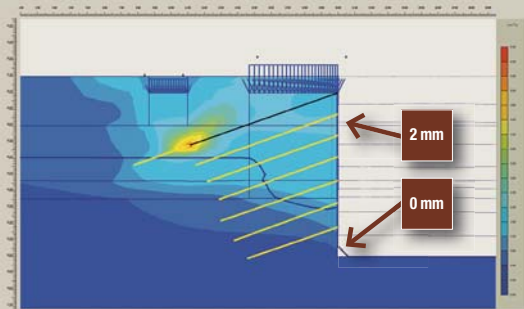
ÉVOLUTION DE LA DÉFORMATION HORIZONTALE

13



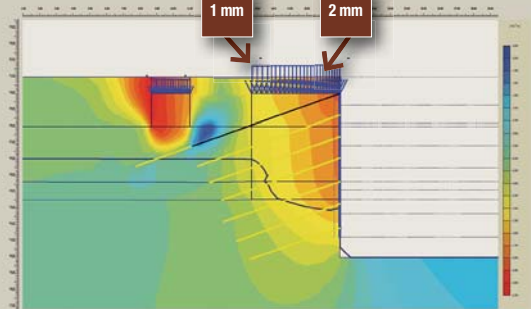
RÉTRO-ANALYSE DÉFORMATIONS HORIZONTALES

14



RÉTRO-ANALYSE DÉFORMATIONS VERTICALES

15



12- Évolution du tassement théorique.
13- Évolution de la déformation horizontale.
14- Rétro-analyse ; déformations horizontales.
15- Rétro-analyse ; déformations verticales.

12- Evolution of theoretical subsidence.
13- Evolution of horizontal deformation.
14- Reverse engineering; horizontal deformation.
15- Reverse engineering; vertical deformation.

Dans la frange améliorée nous considérons une moyenne entre le jet-grouting et la marné calcaire soit :

$E_{50} = 2\ 540\ \text{MPa}$, valeur limitée à celle du calcaire grossier soit $2\ 000\ \text{MPa}$. Enfin, nous prenons en compte les charges précises appliquées au profil concerné.

La prise en compte du phasage complet des travaux a permis de retrouver l'ordre de grandeur des déformées mesurées (figures 14 et 15). Il n'a pas été nécessaire de modifier d'autres paramètres géotechniques.

CONCLUSION

La conception de la reprise en sous-œuvre a nécessité la combinaison de calculs à la rupture et de modélisa-

tion aux éléments finis. L'approche en fourchette retenue a permis de valider le dimensionnement des éléments de reprise en sous-œuvre (clous, tirants, jet-grouting), et de fournir les données d'entrée nécessaires à la mise en œuvre de la méthode observationnelle, indispensable sur ce type d'ouvrage, eu égard à la difficulté du projet et la sensibilité de l'environnement.

La rétro-analyse effectuée à partir du comportement réel de l'ouvrage a permis, en considérant les caractéristiques mécaniques mesurées sur le jet-grouting, de valider la pertinence du modèle géotechnique retenu.

Les travaux se sont déroulés de façon parfaitement normale, et n'ont engendré aucun désordre. □

ABSTRACT

LOUVRE MUSEUM – CREATION OF MUSEOGRAPHIC AND FUNCTIONAL AREAS FOR ISLAMIC ART

SOLETANCHE BACHY; MARC BENGIO, ROMAIN BRIEU, NICOLAS UTTER

The construction of the new department of Islamic Art in the Louvre Museum required the creation of an infrastructure directly below the facades of the Louvre. Prior to these earthworks, as much as 12 metres deep, underpinning of the existing buildings was performed by jet grouting, supplemented by injection. The retaining structure is formed of shotcrete, together with the installation of prestressed anchor ties and studs. A twofold computation approach, by the ultimate design and finite element methods, was needed to determine the consolidation to be applied and the work phasing. □

MUSEO DEL LOUVRE – CREACIÓN DE ESPACIOS MUSEOGRÁFICOS Y TÉCNICOS DE ARTE ISLÁMICO

SOLETANCHE BACHY; MARC BENGIO, ROMAIN BRIEU, NICOLAS UTTER

La construcción del nuevo departamento de Arte Islámico en el museo del Louvre requiere la creación de una infraestructura en la vertical de las fachadas del Louvre. Previamente a este movimiento de tierras que puede alcanzar 12 metros, los recalces de los edificios existentes se realizan mediante la técnica jet-grouting, completada con una inyección. La contención está constituida por hormigón proyectado, asociado con la colocación de tirantes de anclaje pretensados y clavos. Se necesitó un doble estudio de cálculo para la ruptura y los elementos acabados con objeto de determinar las consolidaciones que se debían realizar y la planificación de las obras. □

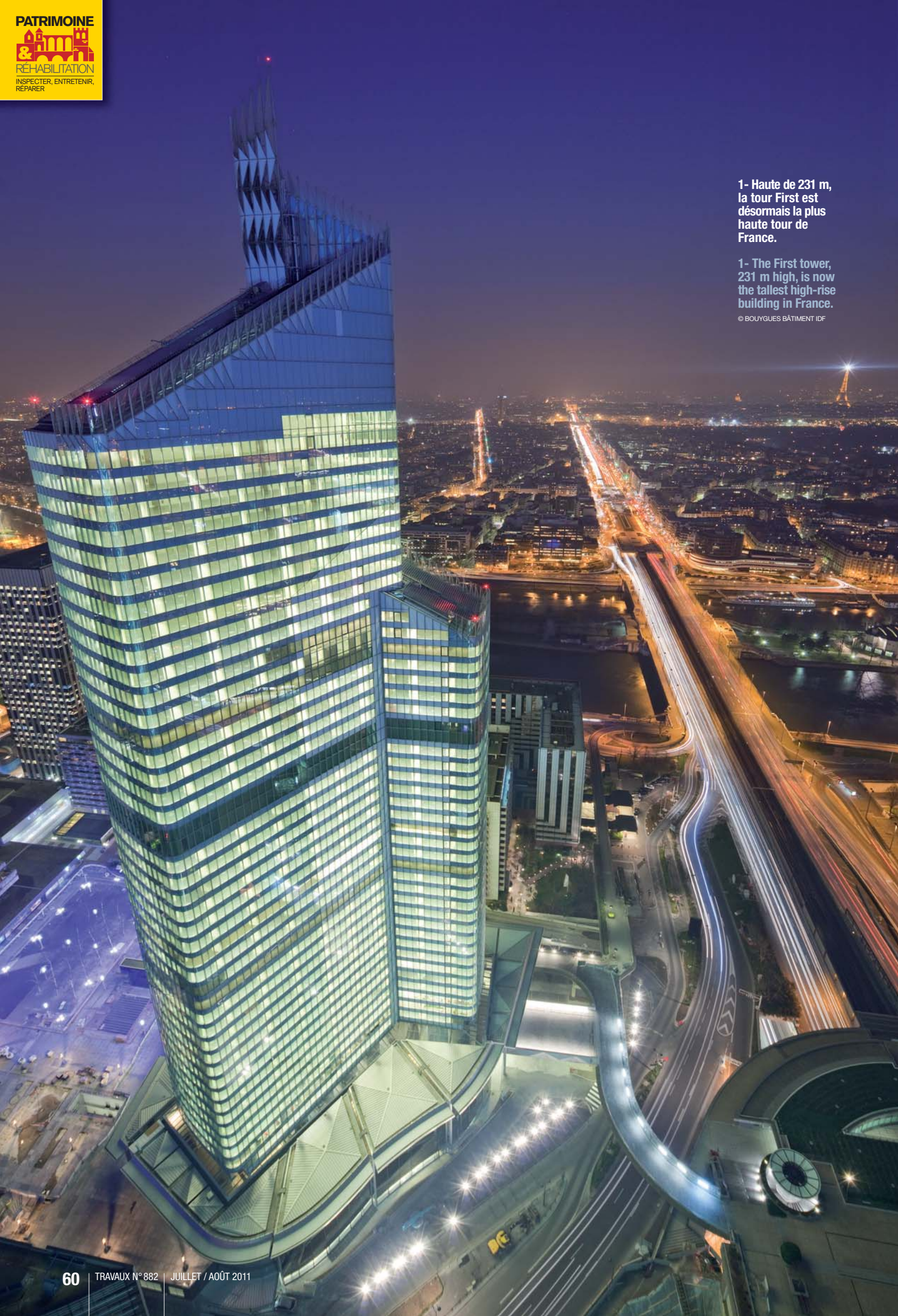
PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Établissement Public du Musée du Louvre

MAÎTRISE D'ŒUVRE :

- Mario Bellini et Rudy Ricciotti, architectes
- Renaud Pierard, architecte muséographe
- BERIM, bureau d'études techniques

ENTREPRISES : Groupement Lainé Delau / Soletanche Bachy France



1- Haute de 231 m, la tour First est désormais la plus haute tour de France.

1- The First tower, 231 m high, is now the tallest high-rise building in France.

© BOUYGUES BÂTIMENT IDF

DE LA TOUR AXA À LA TOUR FIRST : UNE MUTATION COMPLEXE

AUTEURS : CHRISTIAN LASNE, DIRECTEUR TRAVAUX, BOUYGUES BÂTIMENT ÎLE-DE-FRANCE - PASCAL CORNIER, DIRECTEUR DE LA COMMUNICATION, BOUYGUES BÂTIMENT ÎLE-DE-FRANCE

PASSER DE LA TOUR DE 1974 À CELLE DE 2011, EN UN TEMPS RECORD, A REQUIS DES TECHNIQUES ET DES MÉTHODES HORS DU COMMUN. UNE SEULE GRUE OPÉRAIT SUR CE CHANTIER TITANESQUE. LES RENFORCEMENTS ONT ÉTÉ NOMBREUX TANT POUR COMPENSER LE DÉPLACEMENT DU CENTRE DE GRAVITÉ QUE POUR LUTTER CONTRE LE VENT DONT LES EFFORTS SE SONT ACCRUS DE 27 % AVEC LE NOUVEAU PROFIL.

La tour First est désormais l'un des principaux points de repères dans le paysage de Paris-La Défense (Hauts-de-Seine) (figures 2 et 3). Élançée, elle remplace la tour UAP de 1974, pataude, située tout de suite à l'entrée de La Défense depuis Paris, d'où son nom de « première » (photo 4).

Sortie de terre par une véritable mue de l'ancien immeuble de 155 m, devenu propriété d'Axa (photo 5), elle est plus haute, avec 231 m.

Elle abrite 80 000 m² de surface utile contre 67 000 auparavant, soit 5 700 postes de travail contre 4 500 à l'origine. Les architectes anglais - Konn Pedersen Fox - et français - SRA Architectes - ont transformé le bâtiment à trois ailes identiques disposées en étoile, en une tour dite de 5^e génération, plus esthétique, plus confortable, dans laquelle la lumière entre à flots sans surchauffe de l'ambiance. Le tout avec une consommation d'énergie au moins quatre fois moindre. Les travaux devaient être réalisés en trois ans, après désamiantage, d'où une savante combinaison de chantiers qui se sont superposés. Les techniques mises en œuvre étaient connues de Bouygues Bâtiment Île-de-France Rénovation Privée mais leur assemblage sur un seul chantier et de cette taille a nécessité le recours à des méthodologies spécifiques.

Les concepteurs de la tour First sont parvenus à la rendre élançée en cassant la symétrie des trois branches.

L'aile Puteaux a été écrêtée sur dix niveaux avec une pente de 40° environ. L'aile Neuilly en perd trois mais en regagne quatre. L'aile Courbevoie est rehaussée de dix niveaux, soit 50 m (figure 6 et photo 7).



2 & 3- Plan de situation à Paris-La Défense.

2 & 3- Location plan in Paris-La Défense.

Un écran de 36 m de haut en écailles (lutte contre le vent) parachève sa silhouette. Chaque aile est couronnée de plumes - grilles en inox - qui cachent des éléments techniques (photo 8).

UNE RÉHABILITATION LOURDE

La réhabilitation a été décidée suite à des études de faisabilité confiées à Cogedim (aujourd'hui Altarea Cogedim) par Axa en 2001.

Il s'agissait de déterminer quelle solution serait la meilleure depuis une réno-

vation légère jusqu'à une démolition-reconstruction.

Pour chaque scénario, le coût d'exploitation était pris en compte. Deux facteurs ont fait pencher la balance vers une réhabilitation lourde : le risque de toucher aux fondations dans un sol proche de la Seine et peu stable, d'une part, et l'intérêt de conserver le bâti avec une hauteur de dalle à dalle de 3,60 m, ce qui permettait de ménager une belle hauteur - 2,75 m - entre faux-plancher et faux-plafond, d'autre part.

In fine, 80 % de la structure en béton d'origine a été conservée, d'où une économie importante.

L'augmentation de surface répond à la demande de l'Établissement public d'aménagement de la Défense Seine Arche (Epadesa) de densifier les immeubles du quartier (plan de renouveau).

La tour First a gagné aussi en épaisseur. Elle a le pied plus large avec un podium dépassant des façades grâce à une structure métallique et occupant trois niveaux dont un enterré (figures 9a, 9b). Cette partie reçoit des espaces communs comme des restaurants, des espaces de réception, etc.

Par ailleurs, chaque aile gagne 1,50 m sur sa périphérie, ce qui crée un passage de l'une à l'autre sans passer par le noyau. Avant, blocs sanitaires, ascenseurs et escaliers rendaient les ailes hermétiques les unes aux autres sur un même plateau.

PASSER D'UNE TOUR À L'AUTRE GRÂCE À LA MODÉLISATION

Le noyau central a été remanié pour y concentrer toutes les circulations verticales (figures 10a, 10b).

Tous les pignons aveugles ont été transformés en façades vitrées.

Les locaux techniques ont été déplacés, certains en sous-sol, d'autres dans des triangles inexploitable en bureaux. Auparavant, ils occupaient le 27^e étage sur une très grande hauteur. Cet étage « noble » a été reconverti en espace à vivre.

En plus du podium à moitié enterré mais éclairé par la lumière du jour, les entreprises locataires peuvent disposer d'atriums, de 10 m sous plafond, inondés de lumière (figure 11). ▷



© LAURENT BLOSSIER

Toutes ces modifications qui pouvaient prendre place en conservant la structure existante ont toutefois été lourdes de conséquences pour la stabilité du bâti. C'est pourquoi le projet a donné lieu à une intense modélisation par la direction technique de Bouygues Bâtiment Île-de-France afin de prévoir tous les renforcements à mettre en œuvre. L'élargissement et la surélévation ont alourdi la tour de 19 000 tonnes (de 117 000 à 136 000 tonnes). La décharge d'un côté, par écrêtage, et la charge de dix niveaux supplémentaires, de l'autre, ont déplacé le centre de gravité de la tour (figure 12). Ce déplacement de 6 cm en partie haute semble peu à cette échelle mais n'est pas acceptable car les façades doivent être rigoureusement verticales. La modélisation a servi à estimer les nouveaux efforts et les déformées correspondantes.

La tour First offre plus de prise au vent que la tour Axa, de l'ordre de 27 % de plus sur les façades et les poteaux, soit une poussée horizontale de 2 730 tonnes. Le contreventement fonctionne par transmission des efforts depuis les façades vers les planchers ou les poutres (atriums) puis vers le noyau et en descendant jusqu'aux fondations. Dans ce cadre, le renforcement de l'assise de la tour était un élément déterminant. Les nouvelles charges devaient être re-réparties uniformément sur le radier-caisson des fondations, composé de deux dalles de 1 m d'épaisseur reliées par des nervures de 1 m. Sans cela, le noyau central poinçonnerait le sol qui, selon la modélisation, se serait creusé d'un peu moins de 20 cm. Cet effet « cuvette » aurait imprimé au radier une charge excessive. La déformée relative atteignait 8 mm

4- First s'inscrit visiblement dans l'axe historique parisien qui relie le Louvre à la Grande Arche.

5- La tour Axa avant travaux.

6 & 7- Ecrêtage des trois ailes et rehaussement.

4- The First tower clearly fits in with the historical Paris axis linking The Louvre to the Grande Arche.

5- The Axa tower before the works.

6 & 7- Clipping the three wings and heightening.

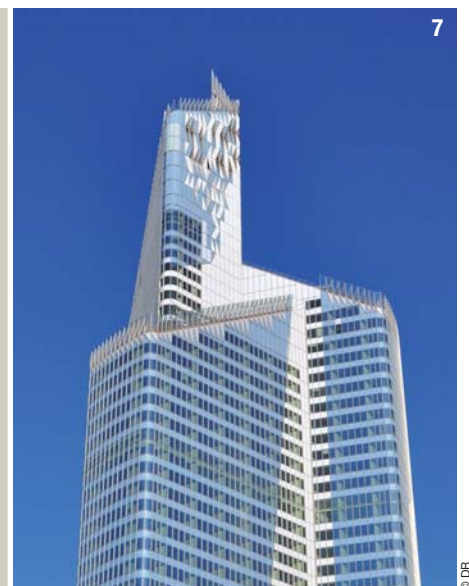
en plus du tassement uniforme du sol. Des mégavoiles ont donc été coulés sur quatre niveaux d'infrastructures sur 1 m d'épaisseur et 15 m de haut, ainsi que sur le radier (figures 13 et 14). Le chantier de ces voiles a dû être soigneusement conçu et planifié. Pour passer ces voiles et leurs coffrages, une tranchée de 15 m de haut sur près de 2 m de large devait être créée en cassant poteaux, voiles et poutres qui se trouvaient sur le chemin. Avant de démolir ces parties d'infrastructures, il fallait temporairement ancrer les structures existantes dans le sol pour les empêcher de « remonter » sous la pression de l'eau (7 m d'eau à ce niveau). Tout ne pouvait pas être cassé en même temps au risque de mettre en péril le bâtiment. Des coffrages en aluminium et bois de 1 m de large par 0,50 m de haut ont été assemblés



5



6

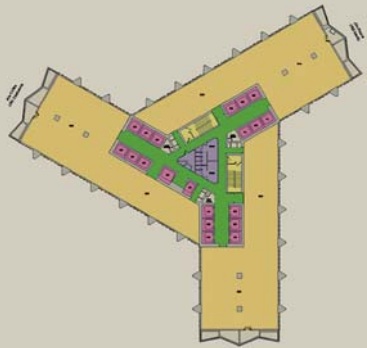


7

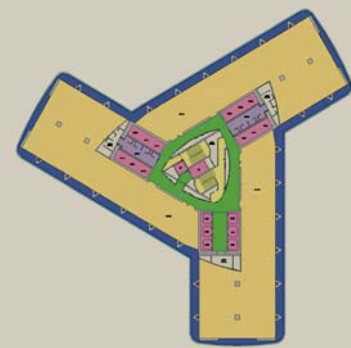
© DR



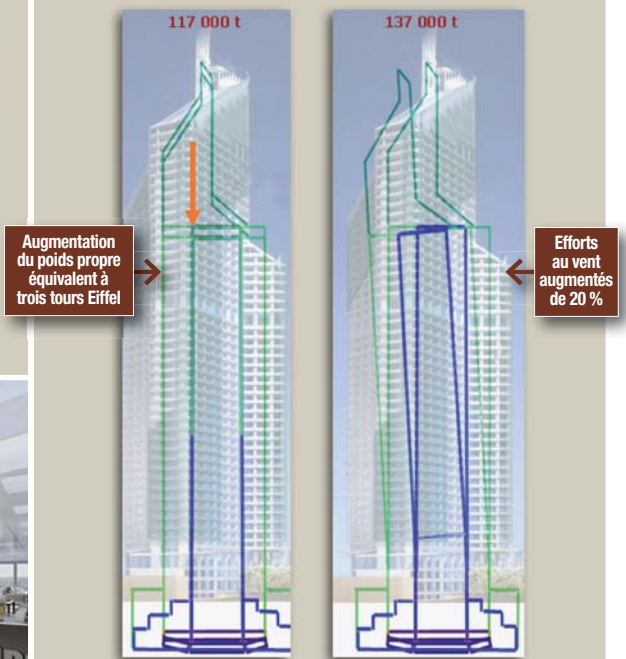
NOYAU AVANT TRAVAUX



NOYAU APRÈS TRAVAUX



IMPACT STRUCTUREL



© BOUYGUES CONSTRUCTION

par clavette sur une hauteur d'étage. Ils étaient ensuite déplacés d'un bloc par treuil électrique pour l'étage suivant. Aux endroits les plus chargés, l'armature de ces voiles devait être rattachée à l'acier du noyau existant. Celui-ci a été mis à nu par un jet d'eau à 2 000 bars de pression et « recousu » avec l'acier neuf.

POTEAUX À RENFORCER

Autre difficulté à résoudre avec les mégavoiles : ils étaient transpercés par les gaines techniques, ce qui les affaiblissait. Ces réservations ont donc été positionnées sur les plans et pris en compte lors de la modélisation. Il a été décidé, à leur endroit, un renfort de 3 m par 3 m sur 1 m d'épaisseur. Ces renforcements en infrastructures devaient être réalisés à 70 % avant de pouvoir surélever la tour et cette opération prenait beaucoup plus de temps que le remaniement des étages supérieurs. Le podium a, lui aussi, donné

- 8- Chaque aile est couronnée de plumes (grilles en inox).
- 9a & 9b- Podium - vue extérieure.
- 10a & 10b- Noyau avant et après travaux.
- 11- Atrium.
- 12- Impact structurel.

- 8- Each wing is crowned with feathers (stainless steel gratings).
- 9a & 9b- External view of the podium.
- 10a & 10b- Core before and after the works.
- 11- Atrium.
- 12- Structural impact.

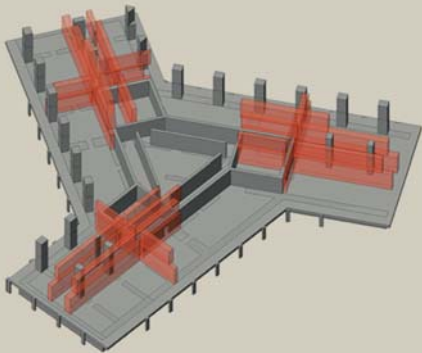
lieu à des renforcements. Créé entre les niveaux -1 et +2, il ne pouvait être baigné de lumière naturelle et atteindre 12-14 m sous plafond qu'à condition de démolir une partie des planchers existants. Mais, sans ces derniers, les poteaux risquaient de flamber. Leur épaisseur a donc été renforcée de 10-12 cm pour s'opposer au fluage. Ils ont été chemisés de béton et d'aciers scellés à la résine pour que leur surface puisse travailler en se fondant avec l'ancien béton (figure 15).

RECRÉER LA PRÉCONTRAINTE

De même, il a été indispensable de renforcer le noyau central sur les 17 premiers niveaux afin d'assurer la descente de charge due au contreventement. Contre les voiles existants de 20 cm a été coulé un contre-voile de 20 cm réalisé dans un béton exactement du même type que celui des années 1970. Il fallait que l'ensemble des 40 cm ait la même résistance par

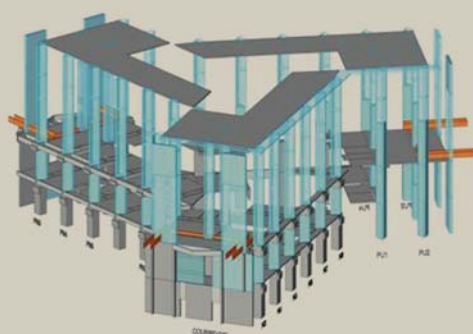
tout, sinon les efforts se seraient portés sur le béton le plus performant uniquement. L'homogénéité des deux bétons a été renforcée par des aciers dont les trous ont été forés par un robot à quatre têtes, évitant un travail long et pénible aux compagnons. La réhabilitation des infrastructures s'est faite de bas en haut, tandis que celle des superstructures allait dans l'autre sens. À ceci, une raison pratique : si les façades basses avaient été démontées en premier (bâtiment évidé), elles auraient mis en danger la tenue de celles situées au-dessus. Les planchers étaient trop minces pour transmettre les nouveaux efforts du vent au noyau. Ils ont donc été post-contraints avec des monotorons passés dans leur épaisseur. Ces aciers viennent rattachés les pignons au noyau et les empêcher de bouger. Pour ouvrir les pignons, il fallait couper des câbles, ce qui faisait perdre la précontrainte. Pour la récupérer avant de couper, ▷

MÉGAVOILES



13

CHEMISAGE POTEAUX



14



15



16

© BOUYGUES CONSTRUCTION

13- Mégavoiles.
 14- Chemisage poteaux.
 15- Renforcements des poteaux du podium.
 16- Dépose des façades et élargissement des arêtes de rive à partir du niveau 40.

13- Megawalls.
 14- Column lining.
 15- Strengthening the podium columns.
 16- Removal of the facades and widening of the end edges above level 40.

Bouygues a employé une technique déjà utilisée sur de plus petits chantiers. Il s'agit de déplacer le point d'ancrage du câble à un autre endroit. Avant de sectionner le câble, il est dégarni localement, un peu plus loin dans le plancher. On l'insère alors dans une sorte de mâchoire avec des boulons et on le noie dans un panier d'armatures. Puis, on recoule du béton. On sèche et on peut alors couper le câble.

CHANTIER EXÉCUTÉ EN DESCENDANT PUIS EN REMONTANT

La nécessité de désamianter tout le bâtiment, opération imprévue, et de respecter les délais cours du chantier, a imposé de mener plusieurs phases de chantier parallèlement. Le grand nombre d'étages permettait de s'organiser en séquence de plusieurs niveaux, chacun à un stade d'avance-

ment différent. Ces ensembles de travail, une fois finis, se déplaçaient tous ensemble plus bas. Cette organisation a concerné les modifications de planchers, façades et noyaux.

Le chantier façades comprenait quatre étapes : la dépose des existantes, la démolition des 3 pignons aveugles, l'élargissement des dalles de rives et la mise en place des façades neuves. Les trois premières s'effectuaient en

descendant, la dernière, en remontant. Ce choix exigeait, bien sûr, de protéger les équipes se trouvant aux niveaux inférieurs.

La dépose des façades et la démolition des ouvrages béton et maçonnerie situés aux extrémités des pignons (murs en arête où passaient les gaines techniques) ont eu lieu en descendant à partir du niveau 40. La surélévation de l'aile Courbevoie n'étaient pas encore

TOUR DE TRÈS HAUTE QUALITÉ ENVIRONNEMENTALE

Déjà certifiée haute qualité environnementale en phases programmation (2005) et conception (2008), la Tour First à la Défense (Hauts-de-Seine) l'a été en réalisation le 30 mars 2011. Elle dépasse les exigences demandées par la Certification NF Bâtiments tertiaires démarche HQE en rénovation. Cinq des 14 cibles à satisfaire ont atteint le niveau très performant au lieu de trois obligatoires, et 5, le niveau performant, au lieu de 4.

En ce qui concerne la partie déchets de chantier, Bouygues Bâtiment Île-de-France Rénovation Privée s'était engagée à atteindre le niveau très performant et elle l'a dépassé avec 54 % des déchets du chantier valorisés alors que 15 % suffisaient. Ainsi 70 000 m³ de bois, béton, métaux, cartons ont été dirigés vers les filières de réutilisation. Le verre n'a pas pu y figurer car celui des années 1970 contenait du plomb, ce qui empêche son recyclage aujourd'hui.

Autre exemple de très haute performance : une consommation d'énergie de 80 kwh/m²/an environ, soit entre quatre et cinq fois moins que celle de l'ancienne tour pourtant moins grande. Grand avantage pour les locataires : les charges baissent. Les concepteurs y sont arrivés en limitant les apports solaires dans les bureaux. Les façades exposées à l'ensoleillement comportent une double peau respirante composée d'un double vitrage plus un 3^e verre placé à 5 cm. Ces lames d'air sont ventilées pour évacuer

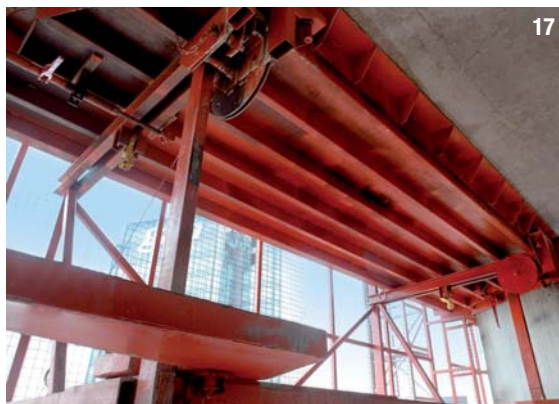
la chaleur. Le fonctionnement des protections solaires est automatisé. Le bâtiment est multi-énergies afin de faire face à des événements comme des pannes ou des coupures de réseaux, et d'être moins pénalisés par les hausses de prix. Il est raccordé au réseau urbain froid et chaud tout en disposant avec sa propre chaudière gaz et de pompes à chaleur. Les confort visuel et hygrométrique sont de très haut niveau.

Il n'est pas nécessaire d'allumer même par temps normalement couvert. La lumière du jour est favorisée. Par exemple, les allèges des vitrages ont été descendues de 1 m à 50 cm et les murs sont clairs de façon à mieux refléter la lumière.

QUATRE PRIX

La tour First a été reconnue comme exceptionnelle par quatre récompenses :

- 1- Grand prix national de l'ingénierie en 2009 pour des ingénieurs d'Altarea Cogedim et d'Iosis ;
- 2- Pierre d'or 2011, catégorie Programmes pour Beacon Capital Partners ;
- 3- Mipim awards 2011 (salon international de l'immobilier Cannes) : meilleur immeuble de bureaux rénovés ;
- 4- Tour du cinquantenaire de la Défense (2008).

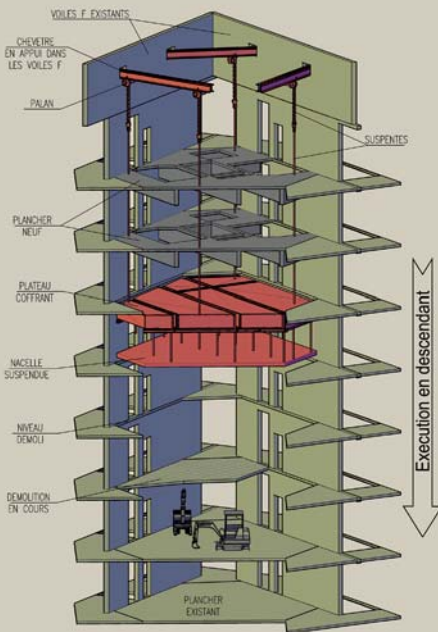


17



18

PHASAGE DU NOYAU OUTIL COFFRANT DESCENDU À L'AIDE DE PALANS



19

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE :
SCI Vendôme Assur (Axa Reim
et Beacon Capital Partners)

INVESTISSEUR :
Beacon Capital Partners,
propriétaire de la tour
depuis sa livraison

**MAÎTRISE D'OUVRAGE
DÉLÉGUÉE :** Altarea Cogedim

**ARCHITECTES, MAÎTRISE
D'ŒUVRE CONCEPTION :**
Konn Pedersen Fox (Grande-
Bretagne) et SRA Architectes
(France)

**MAÎTRISE D'ŒUVRE
EXÉCUTION :** Coteba

**BUREAU D'ÉTUDES
TECHNIQUES :** Iosis

ENTREPRISE GÉNÉRALE :
Bouygues Bâtiment Île-de-
France Rénovation Privée

CHIFFRES-CLÉS

HAUTEUR TOUR FIRST : 231 m

SURFACE UTILE : 80 000 m²,
bureaux sur 52 étages
(5 700 postes de travail)

POIDS : 137 000 tonnes

DURÉE DU CHANTIER :
Quatre ans – 2007-2011 –
y compris désamiantage

MOYENS DE LEVAGE :
1 grue culminant à 260 m,
24 plates-formes mobiles
(élargissement des étages),
5 lifts extérieurs, 1 lift intérieur

**COÛT RÉHABILITATION
LOURDE :**
320 millions d'euros HT

commencée à ce stade (photo 16). Pour élargir les dalles, le périmètre de la tour a été équipé d'outils de coffrage qui étaient suspendus et descendaient au fur et à mesure de l'avancement par des chaînes passant à travers le coffrage de l'extension des arêtes de rive (photos 17 et 18). Pour limiter à 45 m la longueur des chaînes, les palans ont été déplacés à trois reprises pendant le chantier et positionnés successivement au 30^e, 20^e et 10^e étage. Un écart minimum de trois niveaux, permettant trois semaines de séchage, est requis pour que la dalle porteuse agrandie ait la résistance suffisante pour porter l'outil quand il était descendu plus bas.

UN NIVEAU PAR SEMAINE

La modification du noyau central supposait de démolir le centre des dalles et de le recréer aux dimensions et formes voulues. Ensuite, les nouveaux escaliers plus centraux qu'avant ont été construits, puis les parois verticales en maçonnerie avant de démolir les anciens escaliers et de boucher la dalle à leur endroit. Un outil coffrant métallique a été spécialement conçu pour l'ensemble de ces opérations. Il était suspendu par des chaînes reliées à des treuils électriques fixés sur des poutres métalliques prenant appui au niveau 40 de la tour en tête des voiles existants du noyau. Le rythme d'avancement était d'un niveau par semaine (figure 19). □

17 & 18- Coffrage et extension des arêtes de rive.
19- Phasage du noyau. Outil coffrant descendu à l'aide de palans.

17 & 18- Formwork and extension of the end edges.
19- Core work scheduling. Sectional formwork lowered by hoists.

ABSTRACT

FROM THE AXA TOWER TO THE FIRST TOWER: A COMPLEX TRANSFORMATION

CHRISTIAN LASNE, BOUYGUES - PASCAL CORNIER, BOUYGUES

To go from the 1974 tower to the 2011 tower, in a record time, exceptional techniques and methods were required. A single crane worked on this huge project. Numerous strengthening features were added both to compensate for the displacement of the centre of gravity and to combat the wind, because wind forces increased by 27% with the new profile. □

DE LA TORRE AXA A LA TORRE FIRST: UNA TRANSFORMACIÓN COMPLEJA

CHRISTIAN LASNE, BOUYGUES - PASCAL CORNIER, BOUYGUES

El paso de la torre de 1974 a la de 2011 en un tiempo récord ha requerido técnicas y métodos poco habituales. Sólo ha trabajado una grúa en esta gigantesca obra. Han sido necesarios numerosos refuerzos tanto para compensar el desplazamiento del centro de gravedad como para luchar contra el viento cuya energía aumentó un 27% con el nuevo perfil. □

CHANGEMENT DE CÂBLES AU PONT DU TEIL PAR BAUDIN CHATEAUNEUF

Suite à la rupture d'un câble porteur du pont suspendu sur le Rhône de la RN102, entre Le Teil et Montélimar, la Direction interdépartementale des routes Centre-Est (Dirce) a engagé

des travaux qui se déroulent en quatre phases successives. La phase de remplacement des câbles est en cours.



© NICOLAS ROBIN - BAUDIN-CHATEAUNEUF

Ouvrage datant du XX^e siècle et partiellement reconstruit en 1947, le pont du Teil est constitué d'une travée centrale entre les deux pylônes principaux de 235 m, et de deux travées latérales de 40 m. Le dispositif de suspension est formé de deux nappes latérales composées chacune de 16 câbles principaux. Le tablier est relié à ces câbles porteurs par des suspentes verticales. C'est l'un des 16 câbles de la nappe amont qui a cédé en 2007. La Dirce a donc fermé le pont à la circulation des véhicules le 11 septembre 2007. Après des travaux de réparation provisoire en 2008, le remplacement de l'ensemble des câbles a été décidé. L'opération, commencée en juillet 2010, sera bientôt terminée.

POSE DU TABLIER SUR DES PALÉES PROVISOIRES

Après de nombreuses investigations (les analyses ayant montré une diminution de la section du câble rompu due à la corrosion des fils et un risque de récurrence sur d'autres câbles), le scénario de réparation du pont est défini. Il s'agit de conserver le tablier et de remplacer les câbles porteurs.

Le principe : remplacer les câbles après la mise sur appuis provisoires du pont.

Cette opération doit permettre de limiter les incidences sur la circulation des véhicules. Le programme comprend le remplacement des câbles, les travaux sur le tablier de la travée centrale et les appuis, les travaux annexes de mise en conformité des équipements et le remplacement des joints de chaussée.

PHASAGE DES TRAVAUX

→ **Phase 1** (juillet-décembre 2010) : pose du tablier sur des appuis provisoires permettant de supporter l'ouvrage et les charges de circulation ; montage des accès à l'ouvrage ;

→ **Phase 2** (janvier-août 2011) : remplacement des câbles, travaux sur les trottoirs et déviation des réseaux ;

→ **Phase 3** (septembre 2011) : réglage des tensions dans les câbles, protection anticorrosion et poursuite des travaux sur le tablier ;

→ **Phase 4** (octobre-novembre 2011) : fin des travaux sur le tablier, finitions et démontage des accès.

UNE SOLUTION ORIGINALE

Seuls deux ponts suspendus se situent encore sur le réseau routier national : celui du Teil et celui de Bordeaux.

Tous les autres sont gérés par les collectivités. Historiquement, ils enjambent les grands fleuves (le Rhône, la

Loire, la Garonne). Chacun est conçu et construit de manière particulière.

Dans le cas du pont du Teil, deux critères ont été déterminants dans l'élaboration du chantier : le culottage des câbles et les délais en termes de circulation des véhicules. La Dirce exigeait un culottage des câbles parfaitement maîtrisé en usine. Première raison : à l'époque, les culots n'avaient pas été assez chauffés, et le zinc en fusion pour le remplissage des culots s'est resolidifié par endroits, provoquant des trous en surface et une corrosion progressive. Ensuite, la durée des travaux devait être la moins longue possible pour ne pas trop perturber le trafic.

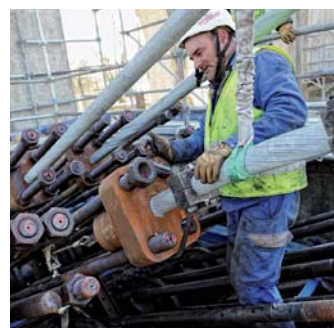
La solution consistait à mettre le tablier suspendu sur des appuis provisoires. Construit dans un bras du Rhône, l'ouvrage a fait l'objet d'un dispositif de surveillance particulier pendant les travaux, en liaison avec la Compagnie nationale du Rhône. Il fallait intégrer de possibles variations brutales du niveau d'eau, dues à la proximité d'une usine hydroélectrique, à des phénomènes naturels (orages), aux incidents de débit dans l'entre-bras, etc.

Tous les câbles seront remplacés, puis l'ouvrage sera fermé pour le réglage de la suspension. Le programme s'achèvera par la protection anticorrosion, la mise en peinture des câbles et de la membrure inférieure des poutres. Ces derniers travaux pourront s'effectuer sous le tablier en circulation.

« Tous les câbles ont été déposés en amont et remplacés par des câbles neufs de 360 m de long et 80 mm de diamètre, soit un poids de 180 t, explique Christian Croizier, chargé d'affaires principal chez Baudin-Châteauneuf. La méthode retenue, consistant à poser le pont sur des palées provisoires, entraînait certaines contraintes, notamment pour accéder au lit du Rhône, mais s'est avérée relativement pratique pour remplacer les câbles, en amont ou en aval. Autre contrainte à prendre en compte : le maintien de la circulation sur une voie pendant toute la durée

des travaux. Outre les interventions dans le lit du Rhône, nous avons tiré à l'aide de vérins à chaque extrémité de câble, et le tablier du pont est ainsi remonté d'environ 50 cm.

La surélévation du tablier a permis de redonner provisoirement à l'ouvrage son galbe initial. Une fois le réglage des câbles terminé, le tablier gardera cette courbure que nous lui avons donnée ». Et de conclure : « Ce chantier est particulièrement intéressant par son ampleur et par les méthodes de réalisation ». ■



© NICOLAS ROBIN - BAUDIN-CHATEAUNEUF

CHIFFRES-CLÉS

317 m de longueur

235 m de travée centrale

15 000 véhicules par jour dont **7 %** de poids lourds

2 pylônes en béton armé fondés dans le Rhône

2 arches symbolisant le passage d'un département à l'autre

400 t de câbles à déposer et reposer

INTERVENANTS

MAÎTRE D'ŒUVRE : Dirce, SIR de Lyon (pôle ouvrages d'art)

ENTREPRISE : Baudin-Châteauneuf

AQUEDUC DE LA VANNE - ARCADES DES SABLONS : INJECTION DE COULIS DE CIMENT ENTRE LA COQUE PEHD ET LA MAÇONNERIE PAR SIRCO

L'aqueduc de la Vanne, construit de 1867 à 1874, contribue à l'alimentation en eau de l'usine de l'Haÿ-les-Roses (94). Il transporte les eaux captées dans la région de Sens, à raison de 145 000 m³ d'eau de source par jour sur une distance de

156 km. Objectif du chantier : injecter la totalité du vide annulaire entre la coque PEHD et la maçonnerie sur 160 m, côté aval des arcades des Sablons.

La réfection de l'étanchéité intérieure de cet ouvrage avait donné lieu, entre 1992 et 1996, à la pose d'une coque en PEHD. Cependant, seuls le radier et la partie basse des parements courbes avaient fait l'objet d'une injection de comblement du vide annulaire entre la maçonnerie et le PEHD. Et, malgré ces travaux, des fuites ont été relevées au niveau des parements extérieurs des arcades. Ces fuites entraînent un lessivage de la maçonnerie, donc un risque de vieillissement prématuré de la structure.

Suite aux relevés métriques réalisés en 2009, des travaux ont été effectués selon les étapes suivantes :

- Réalisation des accès à l'ouvrage pour introduire et sortir le coffrage ;
- Mise en place d'un coffrage adapté à la géométrie avec création d'une saignée circumférentielle dans la coque existante ;
- Découpe des coques pour le positionnement des points d'injection ;
- Préparation et injection du coulis de scellement par tronçon de 32 m ;
- Soudure de bandes en PEHD de largeur minimale 20 cm pour reconstituer la continuité des coques.

Quatre semaines de préparation de chantier ont été nécessaires, comprenant les études préliminaires, la mise en place des installations, des rampes d'accès, etc. Les travaux à l'intérieur de l'ouvrage ont profité de l'arrêt d'eau de l'aqueduc entre le 21 mars et le 13 mai 2011 et se sont étalés sur huit semaines. Enfin, la remise en état, le nettoyage et le repliement des installations ont été effectués en deux semaines.

Le principal accès routier aux arcades était la RD 607. Yves Hugon, dirigeant de Sirco, explique : « Cette réhabilitation présentait plusieurs particularités. Premièrement, nous avons affaire à un tronçon total de 160 m avec un accès



© SIRCO

d'un seul côté, et il y avait une grande distance entre la centrale d'injection et le point d'injection le plus éloigné. Ensuite, nous avons dû adapter notre mode opératoire à cause de l'aspect déformable de la coque, qui était très fine ». Comment ? « En étayant d'avant la coque pendant l'injection, et en injectant un tronçon à la fois au lieu de deux, comme initialement prévu. Afin de ne pas perdre de temps, nous avons utilisé un accélérateur de prise dans le coulis. Cela nous a permis d'enlever les étalements 24 h après l'injection, et ainsi de suite : coffrage-injection avec accélérateur-prise ». Soit 25 m³ de coulis injecté sur 160 m.

CHEMISAGE

Les bandes PEHD mises en place au droit des joints de coffrage sont similaires à l'existant : plaques Bekaplast de

5 mm d'épaisseur ; bandes d'appui et de liaison de largeur 30 mm, épaisseur 5 mm, garnies de crampons ; bandes de liaison étanches pour les extrémités de 50 x 5 mm traitées à la fibre de polyester sur une face ; ciment de résine polyester Oxydur A.

COQUE-COULIS D'INJECTION : UN SYSTÈME PÉRENNE

La totalité de l'espace annulaire entre les coques PEHD et l'ouvrage est remplie de coulis de ciment sous faible pression. Le remplissage est réalisé à l'avancement :

- Création d'une saignée circumférentielle dans la coque existante ;
- Mise en place et réglage du coffrage de maintien ;
- Obturation de l'espace annulaire d'extrémité ;
- Injection du coulis.

Une sortie située à l'opposé du point d'injection permettait de vérifier que le remplissage avait bien cheminé sur les 32 m de chaque tronçon et d'assurer la sortie d'air.

Lors de ces opérations, la température ambiante dans l'aqueduc devait rester stable afin qu'aucun désordre n'apparaisse sur les soudures. En effet, le coefficient de dilatation thermique du PEHD est relativement élevé ($0,18 \times 10^{-3} \text{ m/m. } ^\circ\text{C}$), et la température, lors de la mise en place, doit rester proche de celle de l'eau.

« Avec le système coque-injection, l'ouvrage est redevenu sain pour plusieurs dizaines d'années. Cette solution est la plus pérenne pour ce type d'ouvrage », conclut Yves Hugon.

PROTECTION DE L'AQUEDUC ET DE L'ENVIRONNEMENT

Un autre aspect essentiel de ce chantier était la protection de l'environnement extérieur.

L'aqueduc étant un ouvrage de transport d'eau, un certain nombre de dispositions et de précautions devaient être prises afin d'assurer sa protection sanitaire.

Trois zones constituant trois niveaux de protection ont été définies :

- Une zone de protection immédiate constituée par l'emprise de 15 m de largeur ;
- Une bande de 13 m de part et d'autre de l'emprise ;
- Une zone de 40 m de part et d'autre de l'aqueduc.

Conformément au Plan de gestion environnementale, la gestion des déchets comprenait :

- L'évaluation, la manutention, le stockage et le tri des déchets sur le site et le repli de bennes ;
- L'établissement des bordereaux de suivi des déchets ;
- L'évacuation et le transport vers des centres de traitement agréés. ■



© SIRCO

RÉPARATION ET PROTECTION DES PILES DU PONT D'AQUITAINE, À BORDEAUX, PAR COFEX LITTORAL

Suite à la découverte, lors d'une campagne d'inspection, de blocs de béton instables à une hauteur de 50 m par rapport à la chaussée, le pont d'Aquitaine a dû être réparé et protégé

sur 4 700 m² de béton. Les travaux ont été réalisés sous circulation coupée, en un temps record : cinq week-ends et 18 nuits.



© COFEX LITTORAL

Ouvrage urbain emblématique reliant les autoroutes de Paris et du sud de la France, le pont d'Aquitaine est le deuxième plus grand pont suspendu français (après celui de Tancarville) et se situe au-delà du 80^e rang mondial dans le classement des ponts suspendus.

La portée de sa travée centrale est de 393,75 m. Il est prolongé, sur la rive gauche, par un viaduc de 1 014 m.

Le tablier est à 53 m au-dessus du lit de la Garonne, et les pylônes culminent à 103 m. La suspension (en acier non galvanisé) est constituée de deux faisceaux à section hexagonale comprenant 37 torons de 72,6 mm de diamètre. Chacun des torons élémentaires comprend six couches de fils ronds de 4,1 mm de diamètre (127 fils).

Les 64 suspentes, espacées de 9,95 m d'axe en axe, sont constituées par deux câbles à double brin de 56 mm de diamètre, eux-mêmes constitués de 139 fils ronds de 4,1 mm de diamètre. Le programme imposait un phasage précis des travaux : montage des échafaudages roulants au niveau des entretoises ; montage des nacelles sur toutes les faces des piles ; purge et décapage des bétons à 2 500 bars (sur les 4 700 m²) ; réparation des bétons au mortier de réparation fibré type Lanko ; mise en œuvre d'une résine de protec-

tion en forte épaisseur faisant office de sarcophage pour contenir d'éventuelles dégradations dans les années à venir (résine projetée à chaud) ; application d'une résine de finition teintée anti-UV en protection et décoration générale ; démontage des échafaudages et repliement des installations.

La nature et l'ampleur des travaux imposaient par ailleurs de travailler sous coupure totale de circulation afin d'éviter tout risque pour les usagers. La difficulté était évidemment de fermer un ouvrage aussi important en termes de liaison de raccordement inter-autoroutes et de raccordement entre les rives droite et gauche de Bordeaux, qui ne dispose à ce jour que de quatre ouvrages de franchissement (pont François-Mitterrand, pont Saint-Jean, pont de Pierre et pont d'Aquitaine), en attendant le pont Bacalan-Bastide en cours de construction.

MOYENS D'ACCÈS

Les moyens d'accès sont des nacelles suspendues et roulantes positionnées de manière à couvrir l'ensemble des surfaces des pylônes.

« Compte tenu du planning prévisionnel très limité en termes de délais, il était impératif d'équiper simultanément les deux pylônes du pont en échafaudages, de manière à pouvoir intervenir sur l'ensemble des structures, souligne Éric Barlet, directeur du centre de profit Cofex Littoral. Les moyens d'accès au niveau des entretoises en tête d'ouvrage ont été réalisés avec échafaudages fixes roulants (étant donné la faible amplitude verticale), permettant un rendement plus important ainsi qu'une meilleure sécurité ».

PHASAGE DES TRAVAUX

Lors des réparations des bétons, il faut un minimum de séchage avant le recouvrement par une résine, le délai de recouvrement entre chaque couche de résine étant compris entre 12 et 24 h pour les trois premières couches : l'imprégnation de surface, le primaire

époxy du polyuréthane servant à obtenir l'adhérence sur le support, et le revêtement polyuréthane en tant que tel.

L'enchaînement des étapes a aussi intégré deux facteurs majeurs :

→ Les phases de nuit permettaient de ne couper qu'un seul sens de circulation à la fois, avec intervertissement des postes de travail de chaque côté ;
→ Une zone de passage pour les véhicules d'intervention restait toujours libre, même le week-end, lors de la fermeture complète du pont.

HYDRODÉCAPAGE UHP

Le principe de l'hydrodécapage UHP réside dans l'activation, l'élargissement de microfissures préexistantes au sein du béton suite à la pénétration du jet haute pression. Le matériau quitte la surface quand ces microfissures se rejoignent. Sur les zones de béton endommagé ou fragile, le taux de microfissures est important, ce qui facilite le phénomène de « sélectivité » : seules les parties altérées ou fragiles de la structure en béton sont éliminées, pour ne laisser que la partie saine et solide. Les points faibles du béton et le siège de pores, microfissures, interfaces... facilitent l'hydrodécapage. Celui-ci produit une surface d'excellente qualité. La contrainte de traction - un indicateur important sur la structure de la surface - dépasse la valeur requise de 1,5 MPa (N/mm²) avec 95 % de précision. Enfin, l'hydrodécapage entraîne une rugosité importante, qui augmente l'adhérence entre le béton sain et le nouveau revêtement. La totalité de la pollution des bétons est éliminée rapidement, avec un minimum de déchets. L'état de surface du support est équivalent à un sablage (rugosité parfaite pour l'adhérence de tout revêtement et la mise en œuvre des produits de réparation). L'armature existante reste en place tandis que le béton est détruit ; elle est ensuite propre et prête à recevoir un nouveau béton. Il n'y a pas de déplacement de l'armature dû à d'éventuelles vibrations.

PASSIVATION DES ACIERS

Compte tenu de l'étendue des zones concernées, Cofex Littoral a opté pour un produit ayant une double fonction de passivation des armatures visibles et purgées, et d'inhibiteur de corrosion pour les armatures voisines non mises à nu lors de la purge. Le choix de l'inhibiteur s'est porté sur le Lankosteel 761, combiné organo-minéral formant un film protecteur et demeurant dans la pâte cimentaire, dont les composés de transformation sont également inhibiteurs.

L'application de l'inhibiteur s'est faite en quatre passes de 200 g/m²/passe sur support préalablement humidifié, par pulvérisation basse pression.

La température ambiante devait être comprise entre 5 et 35 °C. Outre l'autocontrôle en phase d'application, environ dix carottages ont été répartis sur l'ouvrage, et les analyses ont permis de déterminer précisément le taux de pénétration de l'inhibiteur dans le béton et de valider l'application.

REVÊTEMENT DE PROTECTION POLYURÉTHANE ET EMMALLOTAGE

Le revêtement polyuréthane possède des caractéristiques exceptionnelles en matière de résistance mécanique et d'allongement, quelle que soit la température extérieure, tout en ayant la particularité de polymériser instantanément. « La résine vient emmailloter la structure et prévenir les phénomènes de fissuration et dilatation qui peuvent provoquer la déstabilisation de blocs de béton. C'est sans doute le seul emmaillotage de ce type et de cette ampleur sur un grand ouvrage en France ! », se félicite Éric Barlet. ■

INTERVENANTS

GROUPEMENT D'ENTREPRISES :
Cofex littoral (mandataire),
BTPS Atlantique, David
Davitec, THP

RÉPARATION DU PONT MÉTALLIQUE TOURNANT DE SELLES PAR ADS

À l'entrée du village de Selles (70), un pont tournant métallique enjambe le canal de l'Est et permet à la route départementale D150 de poursuivre son tracé. Tournant sur un pivot central sous la poussée d'un seul homme, cet ouvrage exceptionnel datant de 1886 est classé Monument historique (il existe seulement deux ponts de ce type en France).

Ouvrage de circulation routière et fluviale important dans la vie locale, il a été restauré par ADS suite à un appel d'offres lancé par le conseil général de Haute-Saône, aidé d'un bureau d'étude privé IOA ayant réalisé l'inspection détaillée et le projet de renforcement pour ramener l'ouvrage à 26 t de charge roulante.

Le pont tournant de Selles présente une mécanique simple : tablier métallique articulé avec pivot permettant sa rotation. Des consoles rapportées dans les années 1950 ont permis l'élargissement de la chaussée et le report des trottoirs en périphérie. Le pivotement du pont s'effectue manuellement. Sa limitation (3,5 t et 3,20 m de hauteur) pénalise fortement l'activité économique en détournant le trafic de la RD150 par Pont-du-Bois et Vauvillers. C'est également le point de passage pour se rendre aux verrières de Passavant-la-Rochère (100 000 visiteurs par an). L'humidité ambiante du canal conjuguée aux infiltrations d'eau de pluie à travers le platelage métallique sont très défavorables à la conservation de l'ouvrage. Les consoles concentrent les eaux de pluie ruisselant le long des ailes des profilés métalliques, formant des poches d'eau sur les poutres principales. La restitution des dispositions d'origine étant incompatible avec les exigences actuelles de largeur de voirie, une solution de restauration particulière a été élaborée.

RESTAURATION DE LA STRUCTURE MÉTALLIQUE

Le classement de l'ouvrage impose une restauration à l'identique avec utilisation de rivets à chaud. Le projet prévoit un renforcement des poutres porteuses par adjonction de plats sur les semelles, ce qui permettra d'augmenter le tonnage à 26 t. Le niveau de la chaussée doit être rehaussé de façon à reposer au-dessus du niveau des deux poutres longitudinales principales et conserver une largeur de circulation automobile de 3 m. Les trottoirs sont également rehaussés et reportés en périphérie au moyen de consoles métalliques. Le programme général des travaux comprend :

- La démolition de parties métalliques datant de 1950 ;



© ADS

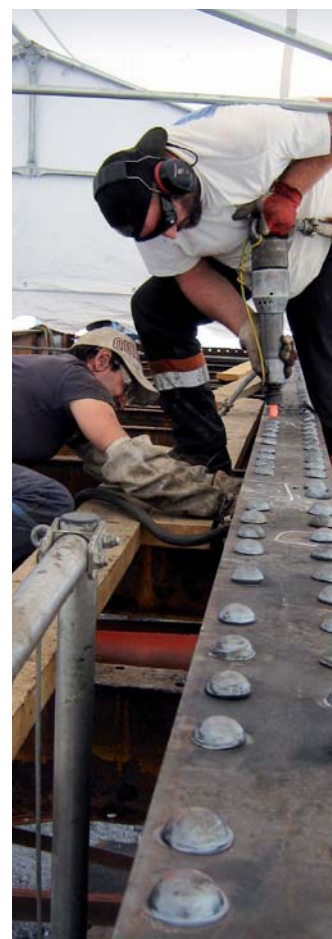
- La dépose du tablier métallique existant et des dispositifs d'appui ;
- Le décapage et le diagnostic de la charpente ;
- La restauration de l'ossature métallique (tôle et profilés en acier) ;
- Le confortement des parties conservées ;
- La conservation maximale des pièces d'origine ;
- La réalisation d'un tablier formant parapluie afin d'assurer la protection au ruissellement des pièces inférieures ;
- La restauration des mécanismes de basculement, pivotement et butée d'arrêt ;
- La protection anticorrosion ;
- La mise en place du nouveau tablier métallique et platelage ;
- Le revêtement sur chaussée et les garde-corps.

UN PLATELAGE ORTHOTROPE NEUF

Le chantier a débuté en février 2010, l'entreprise ayant opté pour un démontage *in situ* et un transport de la structure porteuse (poutres et pièces de pont) dans un atelier de sablage, puis dans les ateliers d'ADS pour diagnostic. Celui-ci a montré un état de corrosion

des pièces de pont très avancé (pertes de section importantes de ces dernières, ainsi qu'au point de fixation sur les poutres principales). Le projet d'origine prévoyant la réalisation d'un platelage sur ces pièces de pont n'était donc plus viable. De plus, l'état de corrosion avancée des structures a notablement modifié les réparations prévues. L'architecte du patrimoine a souhaité que les poutres d'origine soient conservées et que la structure neuve puisse être démontée et changée, afin de conserver la structure porteuse d'origine. L'entreprise a ainsi proposé la réalisation d'une dalle orthotrope fixée sur la structure porteuse restaurée à l'aide de sabots fixés sur l'âme des poutres principales. La mise au point du nouveau projet a imposé un arrêt de chantier de quelques mois. Il faut souligner le choix remarquable du maître d'ouvrage, qui a permis de conserver cette structure témoin de la richesse de notre patrimoine national. 8 000 kg de renforcement, 3 000 rivets et 10 t de structure neuve ont été mis en œuvre. Une fois repeint et protégé par un produit anticorrosion, l'ouvrage a été reposé sur site. Le transport et la manutention ont été particulièrement délicats étant donné le gabarit de la structure

(20 m de long sur 4,50 m de large) et toutes les précautions nécessaires pour respecter les calages et points d'appuis. De plus, le pont devait tourner aussi facilement qu'auparavant pour le manoeuvrier, alors qu'il était devenu plus lourd et plus rigide. Ce point a fait l'objet d'une attention particulière dans le réglage des contrepoids : il a fallu faire de nombreuses rotations pour affiner les jeux et ajustements. Aujourd'hui, l'ouvrage fonctionne et permet de passer sur le canal de l'Est, tout en autorisant, par sa rotation, la navigation des bateaux de plaisance sur le canal. ■



© ADS

TRAITEMENT DES BÉTONS CONTRE LA CORROSION DES ACIERS AUX HALLES BOULINGRIN PAR RENOFORS

Situées près de la porte Mars, les halles Boulingrin, à Reims, ont été conçues par l'architecte Emile Maigrot et réalisées par l'entreprise Limousin sous la conduite de l'ingénieur Eugène Freyssinet, entre 1926 et 1929. Cet ouvrage, emblématique d'un savoir-faire technique novateur et d'une esthétique

remarquable, a été classé Monument historique en 1990. Grâce aux initiatives de la Ville de Reims et de la Drac Champagne-Ardennes, il est en cours de restauration. La société Renofors y a traité les bétons avec des techniques de pointe.

Constitué d'une voûte principale contreventée par des voûtains latéraux et comprenant un niveau de sous-sol, l'ouvrage est un précieux témoignage de l'histoire du béton armé, en particulier par ses voûtes minces. En effet, le système de voûtes fut réalisé en voile béton de 5 à 9 cm d'épaisseur seulement. Cette technicité remarquable pour l'époque a permis de dégager un immense volume intérieur sans piliers et a justifié le classement de l'édifice aux Monuments historiques. Sur une base rectangulaire de 49 m par 109 m, les murs de béton se rejoignent en leur centre, formant une parabole surplom-

bant les étals à 19,85 m de hauteur pour une portée de 38,26 m. L'accès est facilité grâce à deux larges portails sur les tympans à chaque extrémité de la voûte principale, complétés par des portes latérales. Avec le temps, le béton a cependant souffert d'une forte pathologie de carbonatation, en particulier des éléments minces. Il en résulte un développement de corrosion sur de nombreux aciers peu enrobés et un éclatement des bétons. À la demande des maîtrises d'œuvre et d'ouvrage, une campagne d'essais préliminaires a été menée en août 2009 pour définir les techniques de traitement les plus adaptées parmi les suivantes : anodes

galvaniques, protection cathodique à courant imposé, réalkalinisation et inhibiteurs de corrosion.

INHIBITEUR DE CORROSION MFP

Compte tenu de la réactivité potentielle des granulats aux alcalins, il était risqué de faire usage d'une réalkalinisation. De plus, vu la faible épaisseur des voûtes, il était difficile d'y loger des systèmes de protection cathodique par courant imposé ou des systèmes galvaniques, qui auraient requis de très nombreux percements pour réaliser les connexions aux aciers. Enfin, étant donné la qualité moyenne de bétons,

dont la résistance tourne autour de 20 MPa, de leur perméabilité élevée et du faible enrobage des aciers, les inhibiteurs de corrosion sont très vite apparus comme la méthode de traitement adéquate. Elle offrait le meilleur compromis pour traiter les éléments minces des voûtes et voûtains, ainsi que les parements intérieurs et extérieurs situés au-dessus du sol (comportant aussi de nombreuses armatures peu enrobées).

L'inhibiteur choisi est le MFP (mono-fluorophosphate de sodium), appliqué en pulvérisation liquide pour imprégnation du béton, suivi d'une application d'un gel porteur du principe actif MFP. ▷



Cette technique d'application permet d'assurer le maintien de l'inhibiteur suffisamment longtemps sur le parement pour que les mécanismes d'absorption capillaire se déroulent et pour avoir une migration effective du MPF à l'intérieur du béton. Le critère de pénétration imposé (au moins 0,01 % de MFP rapporté au poids de béton au droit des aciers situés en milieu carbonaté) a été atteint d'une manière générale sur les diverses parties de l'ouvrage.

« Le MFP est un inhibiteur de corrosion relativement bien étudié depuis plus d'une décennie, notamment par le LCPC (Laboratoire central des Ponts et Chaussées, thèse Nobel Pujols - 2004). La méthode n° LPC 60 de titrage permet de quantifier les teneurs atteintes dans le béton à diverses profondeurs. Au vu des faibles quantités mises en jeu par rapport à la masse de béton, un inhibiteur n'a pas vocation à rehausser le pH du béton autour des aciers comme le ferait la réalcalinisation qui génère des groupement hydroxydes. Un inhibiteur doit stabiliser les oxydes - ou créer une couche phosphatée comme c'est le cas du MFP - qui protègent la surface de l'acier de la corrosion », précise Carl Redon, directeur technique de Renofors.

PROTECTION CATHODIQUE : UN SYSTÈME D'ANODES ASSURANT UNE LONGÉVITÉ ACCRUE

De leur côté, les bétons des parois périphériques du sous-sol sont constamment soumis à des venues d'humidité. Là aussi, les parements recouvrent peu les armatures, et nombre d'entre elles sont corrodées. « En raison de cette humidité importante, et vu que le sous-sol reste essentiellement un espace technique avec des murs pouvant être cachés ou enduits, il était tout à fait approprié d'y installer un système de protection cathodique à courant imposé pour endiguer les mécanismes de corrosion des aciers. Cependant, il a fallu choisir le système de protection cathodique offrant le plus de gages de longévité. Fallait-il s'orienter vers un système surfacique où l'on maroufle un grillage anodique, le plus souvent en titane dans un enduit sur le vieux béton, ou au contraire un système d'anodes en titane ponctuelles logées dans des forages pratiqués dans le vieux béton et reliées entre elles par un réseau filaire ? C'est la seconde option qui a été choisie », poursuit Carl Redon. Le vieux béton n'ayant pas une cohésion interne de qualité et les apports



© DR

d'eau par l'extérieur étant élevés, il y avait de grands risques de voir un enduit anodique se décoller du substrat et donc qu'une protection cathodique ne fonctionne plus correctement.

Le choix s'est porté sur une anode tubulaire en grillage de titane MMO (Mixed Metal Oxide) revêtue d'un alliage d'oxydes qui lui assure une longévité accrue, et qui comprend une résistance d'entrée afin que le courant de protection cathodique ne soit pas distribué uniquement par les premières anodes du circuit. Les anodes sont réparties suivant un maillage de l'ordre de 40 cm de côté sur toute la périphérie du sous-sol, soit pratiquement sur 1 000 m² de surface décomposée en une vingtaine de cantons. Les chaînes d'anodes de chaque canton sont pilotées chacune par une électronique de régulation des courants. Une unité centrale assure le suivi périodique des courants de protection délivrés, des potentiels acier-béton enregistrés au niveau des électrodes de référence (à raison de quatre par canton) et des tests de dépolarisation normés pour suivre l'efficacité de l'installation.

TRAITEMENT GÉNÉRALISÉ CONTRE LA CORROSION

Qu'il s'agisse de l'inhibiteur de corrosion ou de la protection cathodique, il n'était pas envisageable, pour cet édifice d'exception, de réaliser de simples ragréages traditionnels. Pour les deux techniques retenues, l'entreprise a dû effectuer des séries de contrôles pour vérifier l'efficacité des traitements mis en œuvre. Par ailleurs, des ragréages traditionnels, limités aux seuls rebouchages d'épaufrures, auraient certainement favorisé un mécanisme de corrosion par anode induite. De fait, le long d'une armature, la rouille se développe au droit des zones anodi-

ques, entraînant l'éclatement du béton. Si l'on répare cette zone par un mortier de ragréage, elle devient cathodique. En conséquence, les zones adjacentes apparemment saines deviennent anodiques à leur tour et la corrosion s'y propage... « Il faut toujours garder à l'esprit que la corrosion est avant tout un phénomène chimique résultant de courants entre zones anodiques et cathodiques (micro-piles) le long des armatures : on parle d'électrochimie. Lorsqu'on utilise des traitements, il faut les généraliser à des portions d'ouvrage bien plus étendues que les seules épaufrures apparentes. Ainsi, l'inhibiteur est appliqué tant sur les zones purgées que sur le béton avoisinant, et la protection cathodique est généralisée à tout le parement du sous-sol. Bien entendu, ces travaux spéciaux sont suivis des classiques opérations de ragréage et de finitions architectoniques, qui doivent rappeler ici les parements par coffrage en planchettes utilisés à l'époque. Il s'agit de respecter l'esprit de cette voûte gigantesque et lumineuse, qui semble ne reposer que sur quelques piliers latéraux », conclut le directeur technique. Le projet architectural et technique vise à rendre au bâtiment sa vocation initiale - celle d'un marché couvert -, pour en faire un lieu d'expositions ponctuelles et de diverses manifestations culturelles. Ainsi, tout en finesse et dans l'esprit de Freyssinet, les halles vont redevenir un lieu de vie pour l'ensemble des habitants. ■



© BS

INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Ville de Reims (réalisation) ;
 Drac Champagne-Ardenne (études)

MAÎTRISE D'ŒUVRE : François Châtillon, architecte en chef
 des monuments historiques

GROUPEMENT D'ENTREPRISES LOT 4 - RESTAURATION DES BÉTONS :
 Lefèvre rénovation ; Renofors ; Tollis ; Léon Noël ; MFP SA

RÉHABILITATION PAR PROJECTION DE RÉSINE SUR LE CANAL DU DRAC PAR ETANDEX

Le canal d'amenée de la chute du Drac inférieur dérive les eaux depuis l'aval de la centrale de Pont-de-Claix jusqu'à l'usine hydroélectrique du Drac inférieur, sur la commune d'Echirolles (38). Cet ouvrage en béton non armé de 2 580 m

a été mis en service en 1932. Face à un problème d'étanchéité, EDF a commandité un programme de réparations comprenant la projection d'une membrane résine polyuréthane sur les bajoyers.

L'ouvrage se compose du canal, d'un déversoir, d'un entonnoir et d'une conduite forcée. Constitué de béton non armé, calculé en mur poids stabilisé par des contreforts, il est partiellement enterré. Le canal dérive les eaux du Drac à une vitesse de 2 m/s et un débit de 80 m³/s.

Le tirant d'eau est de 4,70 m et la pente de 0,3/1 000. Le support est un béton cyclopéen dont la majorité des agrégats sont apparents. La partie émergée des bajoyers partiellement enduite est de faible cohésion, l'absence de couronnement ayant détérioré cette zone suite au cycle de gel-dégel. La partie immergée s'avère, dans l'ensemble, de meilleure qualité, mais présente des défauts locaux (fissures, ségrégations, spectres d'enduit...).

Afin d'assurer l'étanchéité et la protection des bajoyers, EDF a prescrit la projection à chaud d'une résine polyuréthane.

Les essais de convenance pratiqués en début de travaux ont montré que sa tenue était meilleure par une projection directe sur les galets qu'en interposant un ragréage hydraulique. La résine polyuréthane Prothane AC (fournisseur : SPPM), en créant un rejointoiement entre les galets, permet de renforcer la surface des bajoyers.

LE PROGRAMME DES TRAVAUX COMPRENAIT :

→ La reprise des crêtes entre les PM 1250 à 2585 : dépose des grillages de clôture existants, démolition contrôlée de la crête sur 30 cm de hauteur et évacuation des gravats, reconstruction de l'arasée nouvelle (ancrages, ferrailage, coffrage et bétonnage, goutte d'eau), remplacement des grillages sur les crêtes ;

→ La reprise du radier entre les PM 1250 à 2585 : rabotage de la surface du radier sur 5 cm par 6,15 m de large, évacuation des gravats, nettoyage du support, exécution du radier



LE CHANTIER EN 14 POINTS

- 1- Nettoyage des bajoyers ;
- 2- Relevé des 18 pathologies ;
- 3- Localisation par marquage à la bombe de peinture en trois couleurs suivant les modes de traitement (vert, bleu, rouge) ;
- 4- Réparation des pathologies (béton projeté, ragréage hydraulique, ragréage Stratilac, traitement des fissures) ;
- 5- Traitement des points singuliers (pont Girard, prise d'eau) ;
- 6- Projection ;
- 7- Conditionnement des postes de travail par atelier bâché, déshumidifié, chauffé et ventilé ;
- 8- Projection de l'Etanprim SH, Prothane AC, Ôstrazur ;
- 9- Pose d'une clôture ;
- 10- Réalisation des travaux dans le déversoir ;
- 11- Renfort par joncs carbone de la pointe amont du déversoir central ;
- 12- Réparation des bajoyers internes des déversoirs latéraux ;
- 13- Réalisation des travaux dans la conduite forcée ;
- 14- Reprise des fissures.

comprenant ancrages, ferrailage, coffrage d'arrêt et bétonnage ;

→ La projection à chaud d'une membrane d'étanchéité à base de polyuréthane sur les bajoyers : préparation de surface par hydrodécapage, réparations et projection à chaud de la résine d'étanchéité.

CONSTRAINTES DE CHANTIER

L'entreprise Etandex a pris en compte plusieurs contraintes : l'installation des équipements pour le chantier à l'abri des intempéries, dans une hygrométrie contrôlée et dans des délais très courts pour respecter la date de remise en service du canal.

« Nous avons équipé des ateliers de 45 m de long et avancions en simultané sur les deux bajoyers », explique Serge Cibert, chef d'agence Etandex, qui a su également adapter son mode opératoire : « EDF avait initialement prévu de ragréer toute la surface et d'appliquer la résine. Suite à différents tests d'adhérence, nous avons préconisé d'isoler les pathologies et d'adapter le traitement. Pour chaque section, nous avons trouvé une solution : ragrassage avec pâte époxy, ajout de résine pour obtenir un revêtement bien adhérent, etc. La caractéristique technique a joué un rôle majeur, et nous avons développé notre logiciel de suivi des projections de résine par enregistrement numérique. Celui-ci permet notamment de doser le volume exact de résine nécessaire ». Ainsi, le canal du Drac est redevenu étanche pour « une bonne trentaine d'années ». Mais le chef d'agence Etandex souligne : « Il y a encore à faire pour entretenir les ouvrages, surtout dans le domaine hydraulique, car l'eau représente une ressource précieuse et un enjeu pour l'avenir ». ■



RÉPARATION D'UN ANNEAU DE RENFORCEMENT DANS LE BARRAGE DE ROSELEND PAR STPL ET CAMPENON BERNARD

EDF a engagé des travaux de réparation d'un anneau au PM 8500 depuis la fenêtre du Reclus dans la galerie d'adduction amont du barrage de Roselend (73). Cette fenêtre est accessible par une piste nécessitant des véhicules 4x4 située en dessous

de la station de ski de La Rosière, via la commune de Bourg-Saint-Maurice. L'entreprise STPL, spécialiste des travaux en galerie de petite section, a été chargée des travaux en groupement avec Campenon Bernard.



Cette solution s'est révélée suffisante. « Compte tenu de la pénibilité du travail (2 600 ml de l'entrée en waders avec 30 à 50 cm d'eau), nous avons choisi une organisation en six équipes, avec trois équipes du lundi au jeudi et trois autres du vendredi au lundi. Si les hommes se sont relayés pour permettre des temps de repos, il n'en a pas été de même pour le matériel, qui a été soumis à rude épreuve », explique encore Jonathan Baude.

REPRISE DE L'ANNEAU SUR 60 m

La réparation de l'anneau par chemisage concernait les 60 m amont entre les PM 8490 et 8550. Le principe consistait à poser des cintres fermés HEB 140 tous les 1,20 m à l'intérieur de la section en place, mais en encasturant les traverses à l'aide de saignées dans le radier existant. Celui-ci devait donc être démolé après la pose des cintres, entre les traverses et par tronçon de 20 m au maximum. Un nouvel anneau de 25 cm d'épaisseur et 60 m de long, intégrant les cintres, devait être réalisé par la suite en béton armé.

« Nous avons démolé les banquettes et le radier (de 20 à 25 cm d'épaisseur), soit environ 140 m³ de matériaux évacués. Il fallait ensuite approvisionner 400 t d'acier et de béton en sac depuis l'entrée de la galerie à l'aide de chargeuses roulantes. À la suite de cela, nous devons préparer le béton et le projeter selon des phasages très particuliers. La complémentarité de nos compétences a permis de trouver les solutions techniques adaptées », précise de son côté Matthieu Zurdo, président de STPL.

DÉMOLITION ET RECONSTITUTION DU RADIER

Le radier a été ferrailé en double nappe. Précisons que la nappe extérieure est interrompue au droit des

filantes qui rentrent entre les ailes des traverses.

La nappe intérieure est complète et passe à l'intérieur des cintres avec un enrobage minimal de 3 cm. Les nappes ont été pointées sur les cintres à l'aide de fers écarteurs.

Le radier a été bétonné à la pompe, par zones successives de 20 ml, par sécurité et à cause de l'avancement contraignant de l'amont vers l'aval.

Les nappes de ferrailage étaient à mailles carrées de 20 cm, avec des sections de fer HA de 10 mm et HA 12 mm, et le béton de type C30 XF3 avec un ciment CEM III B classe 42.5.

RÉALISATION DES PIÉDROITS ET DE LA VOÛTE

En extrémité amont et aval, une engravure de 10 cm de profondeur et de 20 cm de longueur a été effectuée à la scie et au marteau-piqueur pour le raccord en sifflet de 50 cm de longueur sur la hauteur des piédroits de la voûte. Le procédé de ferrailage double nappe était identique à celui du radier. Un béton a ensuite été mis en œuvre en voûte et piédroits sur une épaisseur de 26 cm (jeu de 2 cm + 14 cm de cintres + 6 cm entre intrados cintre et parement fini + 4 cm d'enrobage). Le béton utilisé était le même que pour le radier. ■

« Dans les galeries d'adduction d'eau, la particularité réside dans le fait que l'on se trouve souvent isolé en montagne, avec des zones de travaux éloignées de la fenêtre d'accès. Ces types de travaux nécessitent toute une organisation en termes de moyens humains et matériels. Il y avait d'abord la piste, d'une longueur de 3 km, sinueuse, à flanc de montagne et soumise aux chutes de neige. À cela s'ajoutaient les difficultés d'accès au poste de travail (accessible uniquement en marchant sur une distance de 2 km, avec des débits d'eau très importants). Enfin, le délai très court nous imposait un rythme intense en trois fois huit heures, sept jours sur sept, ce qui correspond, pour trois mois, à 270 jours de travail continu, soit 15 mois en conditions classiques », explique Jonathan Baude, conducteur de travaux chez Campenon Bernard régions. Première phase : les travaux de carrossabilité du radier. Pour rendre carrossable les tronçons du radier sans revêtement (galets, trous, venues d'eau en galerie...) sur environ 50 % de la longueur, l'entreprise a opté pour la mise en œuvre d'un remblai grossier compacté par tracteur et broyeur.



TRAVAUX D'ÉTANCHÉITÉ SUR LE BARRAGE DE ROSELEND PAR OUEST ACRO

Dans le cadre de son grand projet Plus Hydro, EDF a profité de l'abaissement du plan d'eau du barrage de Roselend (réalisé tous les 10 ans) pour lancer la réparation des six joints spéciaux assurant l'étanchéité des six éléments à contreforts susceptibles d'évoluer. C'est l'entreprise Ouest Acro, spécialisée dans les travaux d'accès difficile sur cordes, qui s'est chargée

de la réhabilitation. Le chantier s'est révélé d'une complexité hors normes par la multiplicité des corps de métiers (serrurerie, métallerie, chaudronnerie, génie civil, injection...) nécessaires à la réparation de cet ouvrage de référence dans la production hydraulique française.

Le barrage de Roselend se situe en Savoie, sur la commune de Beaufort-sur-Doron. Grâce à une chute brute de 1 200 m et un débit d'équipement de 55 m³/s, son réservoir permet le fonctionnement de l'usine de La Bâthie, d'une puissance de 546 MW. Construit dans les années 1950, c'est un ouvrage de 150 m de hauteur pour une longueur de couronnement de 804 m. Composite, il est formé en rive droite et en rive gauche d'un barrage poids à contreforts prenant appui sur une voûte centrale à double courbure et à crête tronquée par un plan plongeant vers l'aval au fruit de 1.05. La partie à contrefort est

constituée de 32 éléments de 20 m de largeur. La partie voûte est constituée de 21 plots de 12,5 m de large.

L'épaisseur en crête de la voûte est de 3 m pour une épaisseur maximale à la base de 22 m.

Réalisés au printemps, les travaux de réparation concernaient les six joints spéciaux inter-plots en rive droite et gauche de la voûte centrale du barrage. Ils se sont décomposés en plusieurs phases :

- Inspection des joints ;
- Contrôle de soudures (contrôles non destructifs par ressuage) ;
- Dégagement de la boulonnerie de fixation des couvertures Inox existantes ;

→ Démontage de la couverture Inox existante ;

→ Nettoyage de l'espace entre le waterstop et la couverture Inox ;

→ Remise en état des tuyaux de drainage des joints spéciaux ;

→ Remplacement des tôles Inox de couverture étanche des joints spéciaux ;

→ Mise en place d'éléments spéciaux équipés de trappes d'accès et de clapets à boules en pied de joint ;

→ Remplacement et mise en place d'une membrane d'étanchéité au niveau des fixations de gouttières Inox. Les études ont permis de vérifier la tenue mécanique de la tôle Inox d'étanchéité entre les piles latérales du

barrage. Cette tôle étant soumise à la pression hydrostatique, elle est conçue pour travailler comme une membrane, une fois sa position d'équilibre établie. Afin de contrôler son dimensionnement, un calcul prenant en compte ce phénomène a été effectué.

POSTES DE TRAVAUX EN HAUTEUR

Les fortes contraintes liées à l'altitude (1 500 m) et à la période de réalisation des travaux ont imposé une étude approfondie de l'optimisation des temps de travail.

Ouest Acro a choisi de travailler sur les six joints en parallèle. ▷



Le choix d'une intervention mixte en protection individuelle sur corde et en protection collective avec échafaudage motorisé a été défini conformément au décret 2004-924 du 1/09/2004 relatif à l'utilisation des équipements de travail pour des travaux temporaires en hauteur. Les opérations d'inspection et de démontage ont été réalisées en technique acrobatique. L'installation des nouvelles tôles de couverture et la mise en place d'un système d'étanchéité ont été réalisées sur échafaudages motorisés.

DÉPOSE DE L'EXISTANT

Le démontage des tôles de couverture existante était lié à l'élimination d'une résine d'étanchéité mise en place sur les boulonneries de fixation dans les années 1990. Cela a permis le démontage des plats de serrage du capotage Inox. Le nettoyage de la résine a été réalisé du haut vers le bas par les deux équipes nacelles et l'équipe volante en technique acrobatique.

INSTALLATION DES NOUVELLES TÔLES INOX DE COUVERTURE DE JOINT ORTH

« L'existant n'était pas tout à fait conforme aux hypothèses initiales : les soudures entre les tôles en place n'étaient pas étanches et nous sommes passés de 60 à 463 m linéaires de tôle à changer », explique Marc Rousset, responsable de l'agence Ouest Acro Rhône-Alpes. Pour la mise en place de la nouvelle couverture Inox, les tôles devaient être percées en place. En coordination avec une société albertvilloise spécialisée, des poinçonneuses hydrauliques ont été adaptées aux gabarits de passage entre le génie civil et les profils de fixation existants. « Le soudage des raccordements a été réalisé au TIG (Tungsten Inert Gas) "en position". Le contrôle interne de nos soudures a été effectué par deux de nos inspecteurs certifiés Cofrend-N2 PT », souligne encore Marc Rousset.

MISE EN PLACE DU SYSTÈME D'ÉTANCHÉITÉ

Pour permettre l'étanchéité du nouveau système de couverture, une membrane élastomère en EPDM d'épaisseur 2,5 mm a été mise en place. Une implantation entre les profils métalliques pré-scclés dans le parement amont du barrage et le bord de la gouttière Inox neuve garantissait la compression de la bande élastomère entre les plats de serrage. La bande EPDM a été mise en position après



© OUEST ACRO

la pose de l'ensemble des nouvelles tôles de couverture. Le poinçonnage de l'élastomère a été réalisé à la poinçonneuse hydraulique en position. Enfin, le serrage de la nouvelle boulonnerie en acier inoxydable A4 a été assuré à la clé dynamométrique au couple déterminé au stade des études.

MISE EN PLACE D'ÉLÉMENTS SPÉCIAUX EN PIED DE JOINTS

Équipé d'une trappe de visite et d'un clapet à boule, le nouvel élément de

joint ORTH a été raccordé à l'existant par soudage. Cette liaison est noyée dans une résine bitumineuse confinée par une tôle Inox.

TRAVAUX D'INJECTION AU JOINT 26/27

Outre les travaux de réparation, des travaux d'injection du joint spécial 26/27 ont été entrepris au mois d'avril par les techniciens d'Ouest Acro. Pour fermer latéralement la fissure de pied du barrage, des travaux d'injection

de Siprogel avaient été effectués dans les années 1970. Ce traitement a été altéré par les cycles de déplacement de l'ouvrage et le vieillissement du matériau. Malgré une autre campagne d'injection menée en 2010 dans l'environnement du joint 26/27, le débit de fuite restait important.

Ouest Acro s'est donc vu confier de nouveaux travaux d'injection, en profitant de la vidange décennale pour colmater le joint 26/27 jusqu'à la côte la plus haute possible. La difficulté des travaux était liée aux éléments suivants :

- La présence, au sein du volume à imprégner, de matériaux broyés et extrudés pouvant perturber la pénétration du produit ;
- L'état de dégradation du joint 26/27 ne constitue pas un volume clos et indépendant (résurgences de produits à l'exutoire aval de ce joint) ;
- Le volume total du joint à injecter et sa perméabilité sont mal connus ;
- La présence d'un joint waterstop côté amont du barrage, qu'une pression d'injection mal maîtrisée pouvait détériorer.

Les travaux ont été réalisés par injection de gel méthacrylate de type CarboCryl HV, depuis trois forages débouchant dans la galerie aval du barrage en rive gauche au niveau de la chaussette 26.

Le contrôle des paramètres était assuré par un bloc Lutz raccordé à la pompe d'injection.

Pour le contrôle de l'altitude de progression du produit injecté dans le joint, de nombreux essais préalables à l'eau colorée ont été réalisés. Ils ont permis la réalisation d'une cartographie des correspondances entre les forages existant dans la galerie aval et aboutissant dans le joint 26/27.

Une semaine d'essais d'eau a été nécessaire pour mener à bien la campagne d'injection. Au total, 3 000 l de résine ont été injectés à basse pression et faible débit dans le joint 26/27, assurant son colmatage à la côte 1495 NGF.

Côté effectifs, 14 à 18 techniciens ont travaillé sur ce chantier, parfois en 2 x 8. En tout, la réhabilitation (avec traitement des imprévus) aura duré quatre mois. « Dans les travaux spéciaux, c'est le chantier le plus complexe que nous ayons réalisé, avec de la chaudronnerie-soudure, de la réparation de génie civil, des travaux de forage, de l'injection de résine et l'analyse des paramètres », conclut le responsable d'agence. ■

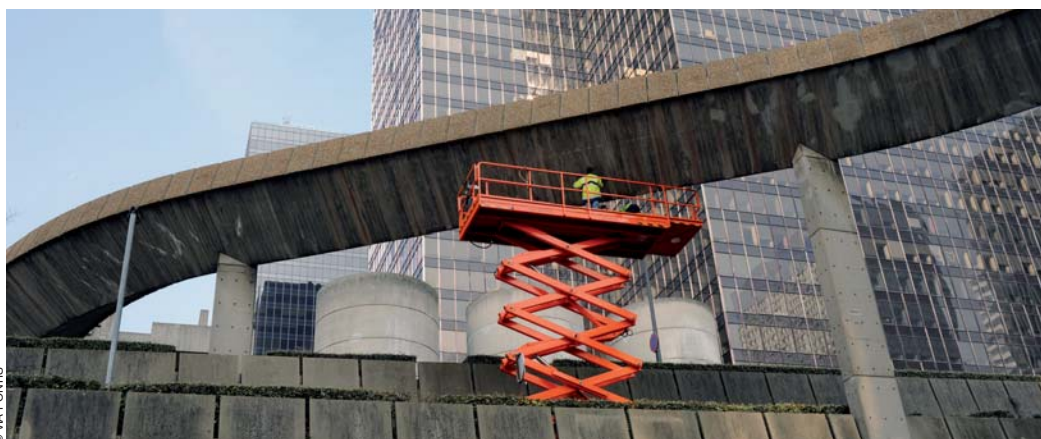


© OUEST ACRO

RÉHABILITATION DE LA PASSERELLE JEAN-MOULIN, À LA DÉFENSE, PAR VIA-PONTIS

La passerelle piétonne Jean-Moulin, située à La Défense (92), permet de franchir l'avenue Jean-Moulin (2 x 2 voies délimitées par un terre-plein central), la rue Jacques-Villon (2 x 1 voie), une voie privée et la sortie du parking Villon. Construite en

1975, elle se trouve au cœur d'un flux de circulation intense. Soumise à la corrosion atmosphérique, la structure a dû être renforcée et protégée.



© VIA-PONTIS

L'ouvrage se compose d'une poutre caisson en béton armé courbe en S et de trois travées (23,70, 16,70 et 20,50 m, la travée centrale étant rectiligne) à section triangulaire. Sa longueur totale est de 62 m pour une largeur de 3 m. Il est encastré sur deux piles en béton armé de section rectangulaire appuyé sur deux culées, et équipé de garde-corps en béton armé. Au niveau des culées, la structure prend appui par l'intermédiaire d'une entretoise en béton armé solidaire du caisson et de deux appareils d'appui en néoprène fretté. Cette passerelle a vraisemblablement présenté des défauts d'étanchéité importants, ainsi que des problèmes structurels conduisant à l'apparition de fissures surlignées par de la calcite en sous-face du caisson. Les fissures à 45° surlignées sur les parties latérales résultent de la combinaison d'un effort tranchant et d'un effort de torsion. Elles témoignent d'un problème structurel considérable, d'où la décision de renforcer l'ouvrage et de traiter le béton contre la corrosion.

LES IONS CHLORURES, SOURCES DE LA CORROSION ACCÉLÉRÉE DES ARMATURES

L'ouvrage présente des désordres importants en termes de matériaux

(armatures corrodées et présence d'ions chlorures dans le béton) et, surtout, de structure. En effet, les fissures observées en sous-face du caisson témoignent d'un comportement structurel anormal.

L'étude a permis de préciser les travaux de renforcement à envisager (re-calculation de la passerelle vis-à-vis des sollicitations aux efforts de torsion et aux efforts tranchants).

Au même titre que la carbonatation, les ions chlorures jouent un rôle important dans le processus de dépassement et de corrosion des armatures.

« À l'intérieur du béton, les chlorures ont deux effets dans les mécanismes de corrosion : ils diminuent la résistivité électrique du béton d'enrobage, ce qui facilite le transport des ions d'un site à l'autre ; et ils permettent l'amorçage plus rapide de la corrosion en dépassant la couche d'oxydes passifs de l'acier. Au final, plus la concentration en chlorures au niveau des armatures est grande, plus la vitesse de corrosion est élevée », rappelle Bruno Berton, directeur de Via-Pontis.

Il est donc essentiel de connaître la quantité de chlorures dans le béton, notamment à proximité des armatures. En termes de concentration en chlorures, il existe un seuil au-delà duquel

la corrosion s'accélère. Lorsque ce seuil (0,4 % de chlorures libres en poids par rapport au ciment ou 0,06 % en poids par rapport au béton) est atteint, la couche de passivation des aciers disparaît, et la corrosion peut se propager.

Les résultats du diagnostic montrent une teneur en chlorures libres qui dépasse largement le seuil critique (> 0,6 %), avec un enrichissement vers le cœur de l'échantillon.

En parallèle, des analyses ont révélé un enrobage correct de 24 mm, avec une très faible profondeur de béton carbonaté (≤ 1 mm).

UN SYSTÈME AUTONOME D'ANODES GALVANIQUES...

Première étape : réparer les fissures. Seules les fissures sur chevêtres doivent être traitées par injection, l'objectif étant de rétablir le monolithisme du tablier à l'aide d'un liant époxy.

Après la pose d'injecteurs plats tous les 30 à 50 cm, Via-Pontis a donc procédé à l'injection de la résine puis au cachetage.

Seconde étape (la plus importante) : mettre en place un système de protection des armatures du béton armé par anodes galvaniques.

Trois critères permettent de choisir la densité des anodes :

- Le rayon d'action d'une anode. L'espacement est de 300 mm au minimum à 500 mm au maximum ;
- La surface d'acier protégée par chaque anode varie de 0,17 à 0,25 m² ;
- La quantité de courant est limitée à 250 mA par anode.

...QUI GÈRE LA PUISSANCE ÉLECTRIQUE NÉCESSAIRE

Le système retenu est composé d'un réseau d'anodes sacrificielles connectées par grappes de 20 à 60 unités à l'aide de fil de titane au réseau d'armatures. Ces anodes sont disposées régulièrement au travers du ferrailage de façon à récupérer les courants de corrosion le plus régulièrement possible. Elles sont pourvues d'écarteurs en mousse qui permettent le centrage de l'anode dans le forage et la bonne répartition de la pâte alcaline.

« Lors de la mise en place, une première étape consiste à passer du courant continu à 12 V pendant sept jours dans les armatures pour provoquer une régénération des aciers et neutraliser les zones de corrosion. La seconde étape est le contrôle de la corrosion par courant galvanique », poursuit Bruno Berton.

Au total, 800 anodes galvaniques ont été placées sur cinq phases, comprenant chacune quatre grappes.

Le système est autonome et gère la puissance nécessaire si la corrosion réapparaît. Avec des contrôles réguliers de mesures en tension, l'ouvrage devrait ainsi rester sain pendant plusieurs dizaines d'années. ■

INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE :
Defacto

ENTREPRISE :
Via-Pontis