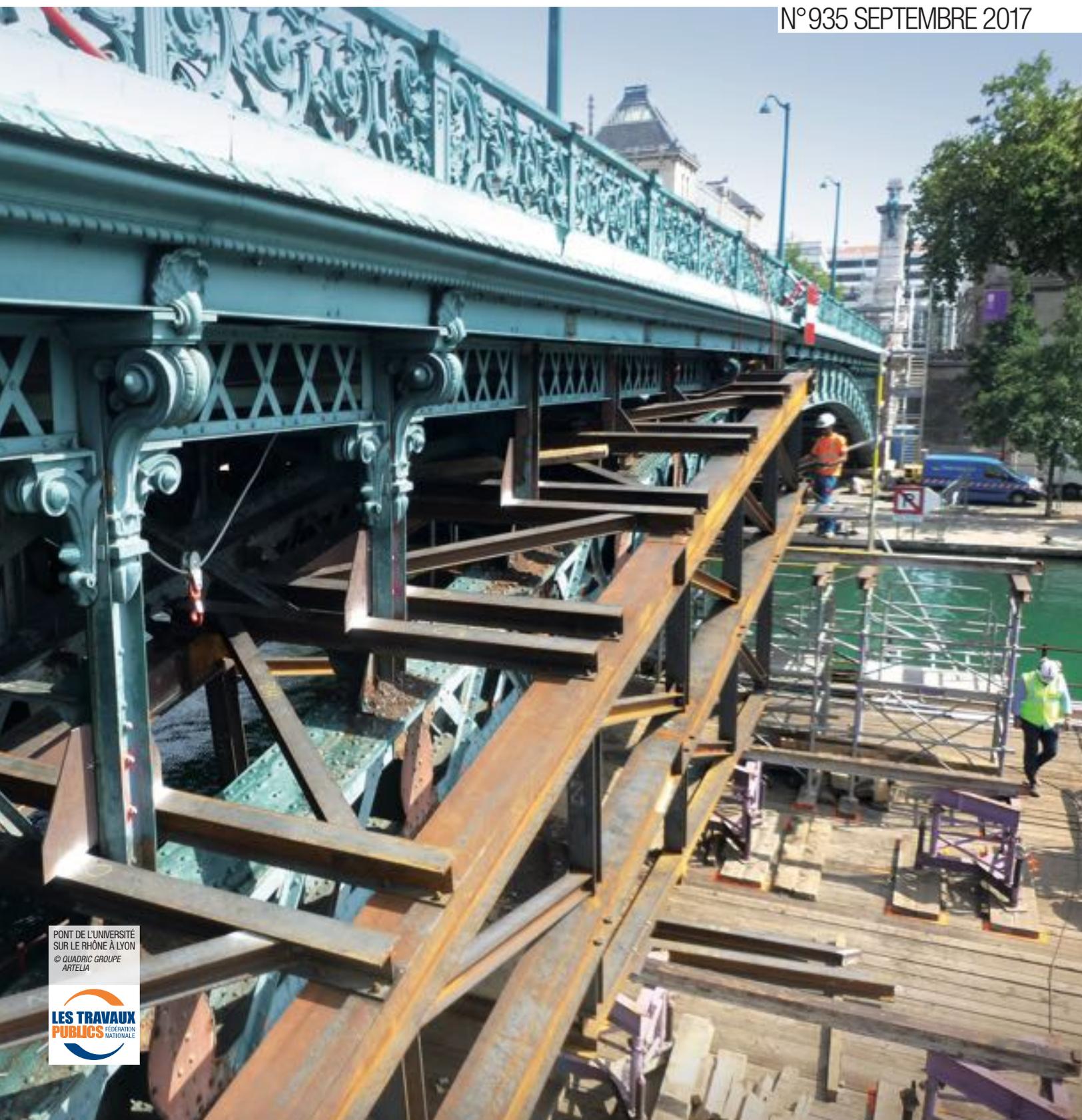


**VILLE & PATRIMOINE. TELEPHERIQUE DE BREST. TRAVAUX DE CONFORTEMENT DES PILES DU PONT D'IENA A PARIS. EXTENSION DE LA LIGNE 1 DU METRO DE LILLE. LE RENFORCEMENT DU PONT PATTON A EVRY. LA PASSERELLE CYCLES-PIETONS D'ANDRESY. TECHNIQUES INNOVANTES POUR LA SAUVEGARDE DU PATRIMOINE GENIE CIVIL. LE REMPLACEMENT DU TRONCON D'UN ARC - PONT DE L'UNIVERSITE A LYON. LA STATION F A PARIS 13<sup>e</sup> - LE PLUS GRAND INCUBATEUR DE STARTUP AU MONDE - LA HALLE FREYSSINET**

N°935 SEPTEMBRE 2017



PONT DE L'UNIVERSITÉ  
SUR LE RHÔNE À LYON  
© QUADRIC GROUPE  
ARTELIA

**Assurer** ses risques professionnels, c'est bien.  
Être conseillé et accompagné, c'est mieux !



Avec SMABTP, à chaque métier son contrat sur mesure et son conseiller spécialisé.

Votre conseiller expert vous recommande **ATOUTP** qui couvre tous les risques des **entreprises de TP** en un seul contrat : pour la protection de toutes vos activités et de vos engins en circulation ou au travail. L'offre s'adapte et se module à chaque type de chantier et en fonction du profil de votre entreprise. Vous obtenez aussi un soutien et des aides dans vos démarches de prévention des accidents.

Et parce que chaque profession est unique, nous déclinons nos solutions d'assurance par métier depuis près de 160 ans.

**Notre métier : assurer le vôtre**



Découvrez toutes nos solutions d'assurance de personnes (dirigeants et salariés), de biens professionnels et d'activités.

[www.groupe-sma.fr](http://www.groupe-sma.fr)



**SMABTP**

BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

SMABTP: société mutuelle d'assurance du bâtiment et des travaux publics, société d'assurance mutuelle à cotisations variables, entreprise régie par le Code des assurances  
RCS PARIS 775 684 764 - 114 avenue Emile Zola - 75739 PARIS Cedex 15

Directeur de la publication  
Bruno Cavagné

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

**Comité de rédaction**

Sami Bounatirou (Bouygues tp), Erica Calatizzo (Systra), Jean-Bernard Datry (Setec tpi), Philippe Gotteland (Fnfp), Jean-Christophe Goux-Reverchon (Fnfp), Laurent Guilbaud (Saipem), Florent Imberty (Razel-Bec), Claude Le Quéré (Egis), Véronique Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau (Soletanche Bachy), Jacques Robert (Arcadis), Claude Servant (Eiffage tp), Philippe Vion (Vinci Construction Grands Projets), Nastaran Vivan (Artelia), Michel Morgenthaler (Fnfp)

Ont collaboré à ce numéro

**Rédaction**

Monique Trancart (actualités notamment), Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente  
Com et Com

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

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

**Publicité**

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

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

Site internet : [www.revue-travaux.com](http://www.revue-travaux.com)

**Édition déléguée**

Com'1 évidence  
2, chemin dit du Pressoir  
Le Plessis  
28350 Dampierre-sur-Avre  
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52  
revuetravaux@com1evidence.com

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

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright by Travaux).

Ouvrage protégé ; photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957), qui constituerait contrefaçon (code pénal, article 425).

Éditions Science et Industrie SAS  
9, rue de Berri - 75008 Paris  
Commission paritaire n°0218 T 80259  
ISSN 0041-1906

## GESTION DU PATRIMOINE, MOBILISATION GÉNÉRALE !



© DR

Construire fait rêver depuis des siècles ; c'est heureux. Gérer, entretenir, rénover suscitent moins d'enthousiasme ; c'est compréhensible, mais c'est dommage, parfois même inquiétant.

L'humanité n'a jamais autant construit que depuis le milieu du 20<sup>e</sup> siècle, en soixante-dix petites années. Avec le temps, nous avons bâti de plus en plus complexe, haut, « ingénieux » aussi. Mais également de plus en plus durable devant les défis des ressources et du climat. La transition énergétique et écologique engagée est inéluctable... malgré quelques soubresauts outre-Atlantique. Elle nous engage plus que jamais vers une gestion du patrimoine existant (qu'il soit foncier, bâti ou enterré) nettement plus exigeante, dynamique et ambitieuse.

La contrainte financière croissante qui pèse sur les acteurs publics dans de nombreux pays accélère le transfert des investissements neufs vers les gros entretiens et rénovations de toutes sortes. Pas le choix. Ces réhabilitations permettent d'accroître la performance énergétique et environnementale de ce patrimoine, mais souvent aussi génèrent des usages nouveaux grâce aux potentialités du numérique. Une bonne nouvelle.

Ce qui frappe enfin quand on parle « patrimoine », c'est l'insuffisance voire l'absence de données structurelles et historiques pertinentes. Les maîtres d'ouvrage et les organismes de tutelle doivent s'engager avec force vers une meilleure maîtrise des données patrimoniales. C'est la mère de toutes les batailles. Car un patrimoine mieux connu, c'est un patrimoine mieux maîtrisé, avec ses économies de maintenance et d'énergie à la clé, c'est aussi l'atout d'une politique d'attractivité et de développement économique.

Heureusement, beaucoup a déjà été réalisé en termes de rénovation du patrimoine (citons par exemple la rénovation des centres des grandes métropoles ou l'amélioration significative des rendements des réseaux d'eau potable en France), mais beaucoup demeure encore à engager pour atteindre l'objectif d'un patrimoine géré avec finesse et anticipation. Avec la montée en puissance rapide du BIM, des SIG, des drones, des objets connectés, des algorithmes de traitement des données en masse, bref de tous les outils numériques, la révolution de la connaissance et de la gestion (notamment prédictive) du patrimoine est bien en route. Il n'y aura pas de marche arrière.

Aussi, en ce 21<sup>e</sup> siècle, le défi commun des ingénieries et des constructeurs est-il bel et bien de procéder rapidement et conjointement à une profonde mutation de leurs métiers respectifs. De concepteurs et aménageurs d'infrastructures et de constructions neuves, nous devons devenir de subtils gestionnaires et des « transformateurs » éclairés du patrimoine existant, au service de villes et de territoires toujours plus durables. Nous l'avons tous compris conceptuellement, nous avançons tous (ou presque !) dans cette direction, il nous reste à accélérer la mutation. En voilà une responsabilité passionnante ! Mobilisation générale !

**BENOÎT CLOCHERET**

DIRECTEUR GÉNÉRAL DU GROUPE ARTELIA

# VILLE



# PATRIMOINE

STATION F À PARIS 13<sup>e</sup> - HALLE FREYSSINET © WILLIAM BAYOL



04 ALBUM

06 ACTUALITÉ



14

**ENTRETIEN AVEC  
MARC MIMRAM**  
UNE ARCHITECTURE  
CONTEMPORAINE IMPLIQUÉE  
DANS LE PAYSAGE HISTORIQUE

20 **TECHNOSOL : L'INGÉNIERIE AU SERVICE  
DE LA GÉOTECHNIQUE**

26 **LE PONT À TRANSBORDEUR DE ROCHEFORT  
RENDU À SA VERSION D'ORIGINE**



32

**LE TÉLÉPHÉRIQUE  
DE BREST**

L'avenir de la mobilité urbaine



38

**TRAVAUX DE  
CONFORTEMENT  
PAR MICROPIEUX**

des piles du pont d'Iéna à Paris



44

**EXTENSION  
DE LA LIGNE 1  
DU MÉTRO DE LILLE**



50

**LE RENFORCEMENT  
DU PONT PATTON**

à Évry



58

**LA PASSERELLE  
CYCLES - PIÉTONS**  
d'Andrésy



64

**TECHNIQUES  
INNOVANTES**  
pour la sauvegarde  
du patrimoine génie civil



72

**REMPLACEMENT  
DU TRONÇON D'UN ARC**

du pont de l'Université sur  
le Rhône à Lyon



78

**STATION F À PARIS 13°**

Le plus grand incubateur de startup  
au monde dans le monument  
historique Halle Freyssinet



## LE PREMIER TÉLÉPHÉRIQUE URBAIN DE FRANCE EST À BREST

**SIAM** est maintenant relié aux Ateliers des Capucins par deux cabines de 60 passagers franchissant la Penfeld à plus de 50 m, avec le tirant d'air nécessaire aux navires de la Base Navale de la Marine. Ce téléphérique à câbles a été inauguré en novembre 2016. C'est le premier ouvrage urbain de ce type en France. Il se distingue par un croisement vertical en saut-de-mouton. Bouygues et Setec, notamment, l'ont réalisé pour le compte de Brest Métropole. À savoir qu'une telle installation se réfère aux Systèmes de transports Publics Guidés et à la réglementation relative aux Remontées Mécaniques. La sécurité fait l'objet des soins les plus attentifs.

**(Voir article page 32).**



## ITER : LES INFRASTRUCTURES IRRIGUENT 42 HA

**Le chantier du réacteur à fusion nucléaire, Iter, se termine en 2020 en prévision d'un premier plasma en 2025.**



© ITER ORGANIZATION/EJF/RICHE

Les réseaux sont construits en même temps que les bâtiments (avril 2017).

Le démonstrateur de la fusion nucléaire, Iter, est franchement sorti de terre à Cadarache (Bouches-du-Rhône). Des bâtiments émergent, par exemple le hall d'assemblage des composants du tokamak - chambre de confinement magnétique où aura lieu la fusion nucléaire d'atomes. À son pied, a débuté le chantier de son enceinte de 80 m de haut<sup>(1)</sup>. D'autres édifices terminés ou en construction abritent des ateliers de préparation d'autres composants d'Iter : assemblage et soudage du cryostat (enveloppe isolante du réacteur, 30 m par 30), production de bobines supraconductrices qui maintiennent le plasma à 150 millions °C dans le réacteur<sup>(2)</sup>. Un autre bâtiment accueille les conver-

tisseurs de puissance pour les bobines du tokamak. Une usine à cryogénie abaissera les aimants à -269°C, température adaptée à la supraconduction, et un système à eau glacée servira à évacuer la chaleur d'Iter.

### → Réseau d'eaux pluviales surdimensionné

En incluant le poste électrique, le siège d'Iter Organization et le secteur des entreprises, dix zones sont bâties sur la plate-forme de 42 hectares. Elles doivent être reliées entre elles et alimentées en eau, assainissement, énergie, télécommunications, etc. Les infrastructures - de l'éclairage public au réseau d'assainissement - sont réalisées au milieu des chantiers de bâtiment. Le marché d'exécution

des infrastructures, le Tender Batch 16 (TB16), a été confié à un groupement mené par Spie Batignolles TPCI (génie civil) avec deux filiales, Valérian (terrassements) et Spie Batignolles Sud-Est, et avec ADF (pose tuyauteries). Des galeries techniques, de 3 m par 3 pour la plupart mais jusqu'à 7,20 m de large sur 5,80 m de haut pour la plus grande, abritent les réseaux secs. Elles plongent l'une sous l'autre quand elles se croisent. Le réseau d'eaux pluviales descend jusqu'à 12 m de profondeur. Son diamètre est surdimensionné de façon à éviter de noyer le tokamak. Les eaux industrielles sont évacuées à part. Tous les réseaux sont mis à la terre.

### → Hautes exigences de sécurité

Les intervenants sur Iter doivent répondre à des normes draconiennes tant sur la sécurité du personnel pendant le chantier qu'en qualité de réalisation. Cela contri-

bue à rassurer le grand public par rapport à un tel équipement.

Ce lot qui inclut 3 km de galeries, 3,9 km de réseau d'eau potable, 3,6 km de réseau industriel/sanitaire, 40 de mise à la terre et 224 000 m<sup>2</sup> de voiries, se monte à 60,7 millions d'euros HT dont 51,6 pour le groupement Spie Batignolles TPCI. Ces travaux, démarrés début 2016, se terminent à la mi-2020.

C'est le 4<sup>e</sup> marché attribué au groupe Spie Batignolles : terrassements de la plate-forme (2008-2009), bâtiment des bobines (2012-2013) et celui du cryostat (2014-2015). ■

<sup>(1)</sup> Le complexe du tokamak a été attribué en 2012 à VFR, consortium franco-espagnol : Vinci Construction Grands Projets, Razel-Bec, Dodin Campeon Bernard, Campeon Bernard Sud-Est, GTM Sud, Chantiers Modernes Sud et Ferroviaire Agroman.

<sup>(2)</sup> Cf. Travaux novembre 2015, n°919, page 14, et juin 2016, n°924, page 15.

## PARTENAIRES INFRASTRUCTURES

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Fusion For Energy (Union européenne).

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :** Engage qui regroupe Assystem et Iosis (France), Atkins (Royaume-Uni) et Empresarios Agrupados (Espagne).

**EXÉCUTION INFRASTRUCTURES :** Spie Batignolles TPCI (mandataire) avec Valérian et Spie Batignolles Sud-Est, et ADF.

## UN PROJET DE PLUS DE QUARANTE ANS

En décembre 2025, le réacteur Iter de Cadarache (Bouches-du-Rhône) sera en mesure de produire son premier plasma, c'est-à-dire de faire fondre un atome d'hydrogène pour produire de la chaleur et ceci, quarante ans après sa création. « D'une durée de quelques centaines de millisecondes, le premier plasma sera suivi d'autres décharges plus puissantes, écrit Iter Organization Magazine (août 2016). Sera ensuite préparée la phase suivante, celle des plasmas d'hydrogène et d'hélium à puissance nominale, prélude à la phase nucléaire et à la production d'énergie de fusion à l'horizon 2035, » date des premières opérations en deutérium-tritium. La température visée dans le tokamak est de 150 millions degrés Celsius. À titre de comparaison, les atomes du soleil fusionnent à 10 millions et les essais menés jusqu'à présent atteignent 3 millions. Iter vise à démontrer la faisabilité

de l'énergie de fusion pour produire une puissance de 500 millions de watts pendant dix minutes. Les déchets auraient une radioactivité à vie plus courte que ceux de la fission nucléaire, principe des centrales actuelles.

### → Premier programme en 1985

Nous devons l'idée de la fusion à l'Union soviétique dans les années 1950.

En novembre 1985, elle propose un programme international sur ce thème au Sommet de Genève<sup>(1)</sup>.

L'Europe et le Japon les rejoignent pour créer l'organisation internationale de l'International Thermonuclear Experimental Reactor (Iter) en octobre 1986 sous l'autorité de l'Agence internationale de l'énergie atomique.

En 2005, 180 ha au lieu-dit Cadarache près de Saint-Paul-Lez-Durance (Bouches-du-Rhône) sont retenus pour construire Iter, démonstrateur d'un réacteur de fusion nucléaire, à côté du site du

CEA (1 625 ha). Le chantier commence en 2007 et devrait être terminé en 2020 pour un budget estimé à 20 milliards d'euros. ■

<sup>(1)</sup> Sommet avec les États-Unis pour maîtriser l'armement nucléaire.



© ITER ORGANIZATION

À gauche, vue sur le chantier de l'enceinte du cœur de fusion nucléaire, le tokamak, devant son hall d'assemblage.

## ITER ET PLUS, SI AFFINITÉS

**L'Union européenne (UE) contribue pour plus de 45 % au coût de l'installation d'Iter. La Chine, l'Inde, le Japon, la Corée du Sud, la Fédération de Russie et les États-Unis sont également engagés dans le projet et participent en nature. L'Inde, par exemple, fournit des tuyaux en inox produit dans ses mines pour le cryostat, enveloppe isolante du tokamak, cœur de la fusion.**

**L'UE agit à travers l'entreprise Fusion For Energy (F4E, 2007-2042) dont la mission va au-delà d'Iter. Elle a un accord avec le Japon sur plusieurs projets "d'intérêt mutuel". F4E prépare des réacteurs à fusion, suite d'Iter.**

## MAINTENIR ET DÉVELOPPER L'HYDROÉLECTRICITÉ



© FRANCE HYDRO ÉLECTRICITÉ

Centrale hydroélectrique Serhy, 2 885 kW sur le torrent de la Vallée étroite, à Nevache (Hautes-Alpes).

« L'hydroélectricité est en difficulté parce que le prix de revente de l'électricité est historiquement bas et depuis 2012, » a alerté Christine Goubet-Milhaud, présidente de l'Union française de l'électricité, lors de la présentation du livre blanc de la filière, à destination des parlementaires<sup>(1)</sup>.

« Nous sommes à la limite de couvrir les coûts de production, a confirmé Anne Penalba, présidente de France Hydro Électricité (petites centrales, 10 MW et moins). La filière fournit 13% de la production d'électricité mais elle peut faire plus. »

L'augmentation de la production passe davantage par l'entretien du parc existant et ses extensions, que par du neuf. Si le matériel se dégrade, la production diminue. Un injecteur décalé sur une centrale de haute chute fait baisser la production de 2-3%. Une conduite forcée encrassée l'ampute de 3-5%.

En cas de grosse rénovation, les sites doivent être mis en conformité avec la réglementation sur l'environnement et sur l'eau, et livrer un courant aux exigences actuelles.

→ **Avoir une vision d'ensemble**

En théorie, la filière dispose d'un potentiel de développement de 11,7 TWh. « Seuls 3 TWh ne sont pas bloqués par des réglementations environnementales car ils se trouvent sur des cours d'eau classés en liste 1, non interdits à de nou-

veaux barrages, informe Anne Penalba. Nous souhaitons une révision de ce classement. »

L'hydroélectricité côtoie l'eau dans toutes ses fonctions, ce qui la confronte à de nombreux textes. Par exemple, le barrage de Serre-Ponçon sur la Durance est aussi une réserve d'eau potable, il régule les crues ou les sécheresses, et attire les touristes.

Les auteurs du livre blanc notent des incohérences entre les politiques énergétiques, environnementales et de l'eau. Ils plaident pour une vision d'ensemble là où il y a éparpillement. La petite hydroélectricité était rattachée, jusqu'à récemment, au ministère de l'Environnement, la grande, à la Direction énergie et climat.

Les instances de décision sur l'eau sont multiples, les textes réglementaires, parfois contradictoires, s'empilent.

→ **600 MW enclenchés en moins de 30 s**

Comment partager l'eau en tenant compte de chaque acteur ? La Convention pour le développement d'une hydroélectricité durable pourrait être réactivée. Chaque projet pourrait être examiné au sein d'une "conférence de projet" réunissant tous les acteurs autour du préfet. Les mesures environnementales pourraient être prises au cas par cas.

Le livre blanc entend accroître la rentabilité économique de l'électricité hydraulique. Ne peut-on pas rémunérer les services qu'elle rend ? Une partie de la production équilibre l'offre et la demande, et complète l'électricité photovoltaïque et éolienne. Une puissance de 600 MW peut être enclenchée en moins de trente secondes et 500-800 MW, en moins d'un quart d'heure.

→ **Moins de taxes**

La diminution des taxes allégerait les coûts. « La fiscalité locale représente 10 euros/MWh, soit près du tiers du prix de vente du marché actuel, » est-il écrit dans le livre blanc. La taxe foncière s'applique aux passes à poissons alors qu'elles ne sont pas des organes de production.

Les appels à projets avec soutien de l'État, actuellement pour la petite hydroélectricité<sup>(2)</sup>, pourraient être étendus à la grande et accompagnés d'un certificat de projet qui fige la réglementation à la date du projet. ■

<sup>(1)</sup> Le 27 juin avec le Syndicat des énergies renouvelables et France Hydro Électricité. Cf. Études de l'UFE sur : <http://ufe-electricite.fr>.

<sup>(2)</sup> Cf. Travaux n°933, juin 2017, page 7.

### 3 FAMILLES

L'hydroélectricité est fabriquée par trois familles de centrales :

- 2 000 au fil de l'eau, production continue 37 TWh/an\*, puissance 7 600 MW ;
- 240 à réservoirs, turbinent l'eau sur demande : 31 TWh/an\*, 13 000 MW ;
- Stations de transfert d'énergie par pompage, 4 000 MW\*\* : stockent de l'eau quand l'électricité est bon marché, la turbinent à la demande.

Elle fournit 60% de l'électricité d'origine renouvelable grâce à 25,4 GW (puissance installée).

\* Chiffre moyen.

\*\* Cf. Travaux n°903, janvier-février 2014, page 8.

### PIERRE VELTZ, DISTINGUÉ

Le grand prix de l'urbanisme a été remis à Pierre Veltz, ingénieur, sociologue et économiste.

Le ministère du Logement et de l'Habitat durable récompense ainsi « un chercheur (...) capable de mettre en synergie les différentes composantes de l'urbanisme et d'y associer étroitement l'aménagement du territoire. »

Pierre Veltz a été PDG de l'Établissement public Paris-Saclay (2010-2015).

Il a dirigé l'École des ponts de 1999 à 2004 puis l'Institut des hautes études de développement et d'aménagement des territoires destiné aux professionnels.

Il a été à la tête de la mission études du Grand Paris, a participé à sa mise en place et à la consultation des urbanistes.

Outre sa Petite ensaïclappédie (2014) sur Paris-Saclay, il est l'auteur de plusieurs ouvrages, le dernier - La société hyper-industrielle - date de 2017.

### TOUJOURS PLUS DE RUES

Le linéaire de routes et rues communales continue d'augmenter. En 2016, il était de 673 290 km contre 666 350 km en 2015 sur un total de 1,074 million de kilomètres, sans compter les 600 000 km de chemins ruraux, selon l'Union des syndicats de l'industrie routière.

Les zones d'activités et les lotissements tirent ce linéaire à la hausse.

Le chiffre d'affaires de la profession semble repartir en 2017 après une baisse de 30% entre 2007 et 2016. L'année dernière, il se montait à 12,2 milliards d'euros en France et 7,4 à l'international.

Les commandes provenaient à 66,5% du public : État, communes (38%), conseils départementaux, régions et grandes entreprises publiques.

## GUIDE RÉSEAU DE CLIMATISATION

Un réseau de climatisation centralisée diffuse moins d'air chaud que tous les climatiseurs individuels mis bout à bout. Il évite d'avoir à renforcer le réseau électrique domestique, il consomme moins d'énergie pour le même résultat. Le froid peut être produit par des énergies renouvelables\*.

Au vu de ces avantages, la Fédération nationale des collectivités concédantes et régies (FNCCR) publie un guide d'aide à la mise en place d'un réseau d'eau glacée à destination des collectivités locales.

Les surfaces imperméabilisées stockent la chaleur de jour et la restituent de nuit, amenuisant le rafraîchissement naturel. Elles génèrent 5-6°C de plus qu'un sol végétalisé, selon la FNCCR.

\* Cf. Travaux n°932, avril/mai 2017, page 10.

## AUTOCONSOMMATION À INTERCLIMA

Le salon Interclima consacre un espace de choix à l'autoconsommation d'électricité photovoltaïque, avec conférences et exposants (production, stockage, gestion de l'énergie) du 7 au 10 novembre à Paris Nord-Villepinte. Rappelons qu'une ordonnance autorise et organise la consommation sur place de l'électricité produite par des capteurs solaires, couplée à la vente du surplus sur le réseau (loi n°2017-227 du 24 février 2017), là où il fallait choisir entre les deux.



Installation photovoltaïque en autoconsommation dans l'Eure.

## COMMENT LES ÉTABLISSEMENTS PUBLICS FONCIERS RECYCLENT LES FRICHES

La reconversion des friches ne fait pas toujours bon ménage avec la conservation du patrimoine. « On peut comprendre qu'un bâtiment industriel soit inscrit dans l'histoire d'un quartier et, à ce titre fasse partie de son patrimoine vécu - comme le site Renault sur l'île Seguin (Hauts-de-Seine) dont le portail a été conservé, est-il écrit dans le rapport du Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) sur les pratiques des établissements publics fonciers (EPF) en matière de requalification de friches urbaines et industrielles<sup>(1)</sup>. Pour autant, une nouvelle vie de ces bâtiments ne sera possible que dans le cadre d'une reconversion techniquement, socialement et financièrement équilibrée. » Autrement dit, la conservation intégrale rend parfois difficile la modernisation nécessaire. Toutefois, les EPF « accordent un soin particulier à la réhabilitation des sites classés ou inscrits » mais « ils regrettent parfois que le dialogue avec les architectes des bâtiments de France ne soit pas plus ouvert. »

### → Des abris pour la biodiversité

Les EPF sont reconnus comme ayant une forte capacité de dialogue, de proposition et d'adaptation, dans l'analyse du CGEDD qui débute par une liste de 13 recommandations dont 4 pour l'administration. En ce qui concerne la prise en compte de la biodiversité, classée dans les difficultés rencontrées comme la préservation du patrimoine, les EPF enquêtés constatent différentes attitudes selon les Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement, faute d'une doctrine nationale unifiée. Ils observent que « elles peuvent cependant adopter une approche pragmatique dès lors qu'elles sont associées aux projets suffisamment à l'avance. »<sup>(2)</sup> Les friches industrielles abandonnées abritent une faune et une flore, parfois exceptionnelles, qui y ont prospéré à l'écart de la présence humaine.

### → Fort impact du désamiantage

L'activité "reconversion de friches industrielles" des établissements publics fonciers de l'État a représenté 140 millions d'euros par an (2010-2015) pour l'achat de 150 ha et 30 millions de travaux (inclus). La part de ces derniers augmente.

« Le désamiantage représente un poste de plus en plus lourd, indique le CGEDD. (...) Le récent relèvement des exigences normatives, notamment pour les très

faibles teneurs (enduits par exemple), déstabilise un tissu professionnel mal préparé et conduits à des résultats peu performants et très coûteux. L'impact sur le bilan des opérations est aujourd'hui préoccupant. » Le désamiantage et la dépollution vont faire baisser l'activité reconversion des EPF. Les sites en renouvellement urbain pourraient soutenir l'activité au niveau de 150-160 millions d'euros par an.

### → Le logement en tête

L'habitat est la 1<sup>re</sup> destination de la reprise de friches industrielles, ce qui contribue à limiter l'étalement urbain.

Les EPF d'État ou locaux acquièrent du

foncier - friche ou non - pour une collectivité, par convention, le rendent apte à porter un programme défini, portent le foncier pendant une durée déterminée, et le cèdent à la collectivité ou à un bailleur social, un aménageur ou promoteur.

### Pour en savoir plus :

[www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/010379-01\\_rapport\\_cle2faa92.pdf](http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/010379-01_rapport_cle2faa92.pdf). ■

<sup>(1)</sup> Auteurs : Philippe Grand et Jérôme Peyrat. Rapport n°010379-01 : novembre 2016.

<sup>(2)</sup> Cf. Travaux n°933, juin 2017, p 6.



Deux vues des anciens abattoirs du Petit-Quévilly (Seine-Maritime). L'EPF Normandie se charge du portage foncier et de la démolition commencée en août, avant création d'un parc urbain avec logements par RNA pour la commune.

## CONFORTEMENT DE PILES : FORER À HAUTE CADENCE



Le carrousel est installé sur une plate-forme de travail. La pile du pont a été dégagée jusqu'à ses fondations.

Les précipitations tropicales provoquent des crues éclair qui lessivent les matériaux sur lesquels reposent les piles de pont.

Si rien n'est fait, les eaux souterraines délavent les sables. Des vides se créent et la pile s'affaisse. Ainsi, celles du pont métallique de la Rivière des pluies à Saint-Denis-de-la-Réunion (RN 102) devaient-elles être protégées de ce phénomène.

Les travaux de confortement des assises ont été planifiés en dehors de la saison cyclonique (janvier-avril) et en maintenant la circulation.

De mai à décembre 2016, une pile de ce pont a été confortée et une culée, sécurisée. Les deux autres piles sont en travaux depuis mai et jusqu'à octobre.

→ **Utilisation d'un carrousel de forage**  
Ces interventions ont été rapides grâce à l'utilisation d'un carrousel de forage. Le carrousel s'installe sur une plate-forme de travail autour de chaque pile, au pied des fondations.

Cette structure métallique de 60 t comporte des glissières en partie haute sur lesquelles se déplacent deux mâts de forage.

Ainsi, les manipulations de mise en station pour forer sont-elles réduites au minimum.

Des micropieux jointifs, diamètre 250 mm, sont descendus sur 10 m. Scellés par du ciment, ils forment une barrière étanche autour des matériaux d'assise de la pile (0-3 000 mm).

Ces derniers sont ensuite renforcés par injection d'un coulis de ciment.

Grâce à cette disposition de type industrielle, jusqu'à 12 forages par jour ont pu être réalisés, sur 10 m de profondeur d'un seul tenant.

→ **3,3 millions d'euros**

Le carrousel a été conçu par les services mécanique et recherche & développement de GTS.

Les travaux sont réalisés par ses deux filiales réunionnaises : Rocs (mandataire, micropieux) et SGTPS (terrassment, génie civil).

Maîtrise d'ouvrage : Région Réunion et maîtrise d'œuvre (service ouvrages d'art). Montant des travaux : 3,3 millions d'euros HT.

Ce dispositif a été candidat au trophée de l'innovation de Solscope, en juin (cf. article page 11). ■

## CARRIÈRE RÉAMÉNAGÉE À LA MARTINIQUE

La carrière du Petit Galion en Martinique a été transformée en centre de valorisation et traitement de déchets, en 2016. Afin de ne pas polluer l'environnement, ses parois ont été recouvertes d'un béton projeté et d'une barrière étanche montée sur profilés. Des fossés ont été ménagés et le site, sécurisé.

Les déchets descendent dans la fosse par deux toboggans métalliques de 45 m de long par 3 m inclinés à 30°.

Les lixiviats, liquide produit par les déchets, sont extraits dans une remontée en béton armé, inclinée à 10° et constituée d'éléments préfabriqués de 3 m de côté empilés sur 35 m de haut, soit 500 t. En tête d'ouvrage, GTS a réalisé une paroi coffrée en béton projeté, opération délicate.

Autre difficulté : créer une engravure par minage dans la roche en respectant une pente compatible avec l'implantation des deux ouvrages.

Le Syndicat martiniquais de traitement et de valorisation des déchets, maître d'ouvrage, a confié les travaux à GTS (mandataire) avec Sogea Martinique (génie civil, préfabrication). Maîtrise d'œuvre : Antea Group.



Ouvrage de remontée des lixiviats.

## BARRIÈRE PARE-VÉHICULES

Maccaferri a installé une protection contre l'intrusion de véhicules sur la Promenade des Anglais à Nice (Alpes-Maritimes). La barrière, constituée de poteaux et de câbles, court sur 1 km. Trois mètres séparent deux poteaux de façon à laisser passer des poids lourds, hors période d'alerte, une fois les câbles démontés. Le procédé anti-intrusion de véhicules MacSafe™ développé par Maccaferri comporte deux câbles longitudinaux soutenus par des poteaux en acier de 30 mm d'épaisseur, ceux d'extrémité étant équipés de dissipateurs d'énergie (freins). Les tests de résistance aux chocs, inspirés de ceux mis en œuvre pour les écrans pare-blocs, ont montré qu'à 300 kJ, le système se déformait de 1,32 m et qu'il résistait encore à un 2<sup>e</sup> impact jusqu'à 137 kJ. Trois principaux types de fondation sont possibles selon la présence de réseaux : longrine avec barres d'ancrage, dalle de frottement surfacique ou sur micropieux.



La protection en cours d'installation sur 1 km à Nice : deux câbles longitudinaux sont ensuite passés à travers les poteaux.

## ASSYSTEM, OPC DU RER ÉOLE

SNCF Réseau a choisi de confier à Assystem, l'ordonnancement, le pilotage et la coordination (OPC) du prolongement du RER Éole vers l'ouest de Paris. En six ans, 8 km de nouvelles infrastructures devront être construites.

## VOUSOIIRS PROVISOIRES

Des voussoirs provisoires en béton fibré non armé sont utilisés pour les voûtes de 4 stations de la 2<sup>e</sup> ligne de tramway de Nice (Alpes-Maritimes) qui ouvre en 2018. La ligne comprend 3,2 km en souterrain dans le centre. Ces voussoirs seront détruits quand les stations seront réalisées. En partie courante du tunnel, les voussoirs sont en béton armé. Au total, 1 820 éléments de 1,60 m de large, 8,50 m de diamètre intérieur et 40 cm d'épaisseur ont été posés jusqu'en juillet. Ils ont été fabriqués par Stradal à partir d'un ciment Duracem de Ciments Calcia.



Voussoirs en attente d'être posés sur la 2<sup>e</sup> ligne de tramway de Nice.

© CIMENTS CALCIA

## LE TRAMWAY D'AVIGNON EN ROUTE

Le génie civil du tramway d'Avignon (Vaucluse) a été confié à un groupement mené par NGE, les voies ferrées et les rames l'étant à Alstom. TSO, filiale de NGE, va construire 5,4 km de plateformes, 10 stations et un centre de maintenance. Fin des travaux : janvier 2019.

## LIGNE 15 : 3<sup>e</sup> LOT À VINCI CONSTRUCTION

Vinci Construction (mandataire) associé à Spie Batignolles a remporté un contrat de 926 millions d'euros HT, 3<sup>e</sup> lot de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express.

Le marché comprend le génie civil de cinq gares, un tunnel de 8,2 km ainsi que le traitement de carrières et la dépollution de terrains.

## AGRANDISSEMENT SOUTERRAIN DU THÉÂTRE DE CHAILLOT



© ALEXANDRE SORIA/LÉON GROSSE/OPPIC

Un puits a été creusé dans le toit d'une ancienne carrière pour loger un monte-décors.

Le Théâtre national de la danse de Chaillot (Paris 16<sup>e</sup>) vient de rouvrir ses portes après trois ans de travaux. La salle Gémier, la petite, a été réaménagée. Au-delà, une circulation verticale centrale dessert tous les espaces rendus accessibles aux personnes à mobilité réduite. Le public entre désormais par le parvis, côté Tour Eiffel, en bas, et non plus place du Trocadéro, en haut. Le Palais de Chaillot qui abrite aussi la Cité de l'Architecture et du patrimoine, est construit sur la colline du même nom. Le théâtre n'a jamais été vraiment adapté à sa destination. La salle Gémier, 440 places, avait été logée dans l'ancien

fumoir en 1967. L'exiguïté des lieux rendait le travail des équipes techniques pénible. Impossible d'agrandir par l'extérieur, le bâtiment et ses abords étant classés monument historique depuis 1980.

### → Fondations de deux palais

Un puits de 15 m de profondeur, 55 m<sup>2</sup> de surface, et des galeries ont donc été creusés dans le sous-sol. Y sont installés un monte-décors et trois tunnels à décors qui donnent un accès direct aux plateaux scéniques : un de 45 m vers la salle Gémier (aujourd'hui 390-600 places), un de 22 m vers la salle Vilar (1 300 places) et un de 17 m vers le parterre de Gémier.

Ces creusements ont été opérés à travers le plafond d'une ancienne carrière de calcaire sous le Palais et entre les fondations de deux époques différentes, celles du Palais du Trocadéro (1878) en maçonnerie de pierre, et celles du Palais de Chaillot (1937) en béton armé.

Les deux bâtiments ont été construits à l'intérieur du même périmètre, à l'occasion d'expositions universelles, le premier cédant la place au second.

La simplification des circulations horizontales va faire découvrir au public des couloirs décorés de fresques.

La réfection du parvis a donné lieu à l'évacuation de 400 t de déchets pollués par l'amiante contenue dans le complexe d'étanchéité.

### → 2<sup>e</sup> tranche de travaux

Cette première tranche de travaux coûte 21,5 millions d'euros TTC. Elle s'inscrit dans le schéma directeur de rénovation du théâtre (2011). La 2<sup>e</sup> tranche (2020-2021) va s'attacher aux travaux sur la salle Jean Vilar, notamment à la création d'une salle de répétition située en dessous. Entre-temps, les terrasses seront restaurées.

Maîtrise d'ouvrage déléguée : Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la Culture ; maîtrise d'œuvre : Lionel Dubois (monument historique) et Brossy & associés (rénovation théâtre) ; gros œuvre étendu : Léon Grosse. ■

## UNE PASSERELLE SURVOLE UN VIEUX PONT

La future passerelle sur la Seine entre Poissy et Carrières-sous-Poissy (Yvelines) passe par-dessus le vieux pont, en ruines depuis 1944. Il ne reste que quatre piles du XII<sup>e</sup> siècle, massives mais en mauvais état, et les culées. Leur restauration aurait augmenté d'un tiers le coût de la passerelle. Elles ne peuvent donc pas servir à supporter le cheminement piétons et vélos entre les deux communes qui veulent communiquer davantage. Côté Poissy (37 500 hab.), la gare sera desservie par la prolongation du RER E, en plus de deux autres lignes. Carrières (15 000 hab.), de son côté, abrite le Parc du peuple de l'herbe et un futur quartier de 44 ha.

La concrétisation de ce lien a été confiée à Ney & Partners par l'Établissement public d'aménagement du Mantois Seine

Aval (Epamsa), mandaté par le Syndicat mixte d'aménagement, de gestion et d'entretien des berges de la Seine et de l'Oise.

### → Piles en béton entre celles en maçonnerie

Le tablier, en tôle, repose sur cinq nouvelles piles en béton dont deux sont insé-

rées entre les vestiges. Elles sont reliées au tablier par des bracons. Les culées, rénovées, auront moins de poids à supporter que par le passé. De loin, la passerelle de 300 m semble reposer sur les anciennes piles.

Les travaux doivent commencer en 2020. Coût : 18,5 millions d'euros HT. ■



La passerelle relie Poissy à Carrières-sous-Poissy (Yvelines).

© NEY & PARTNERS/HAYES DAVIDSON

## INNOVATIONS EN GÉOTECHNIQUE, FORAGE ET FONDATIONS

La société M-S, spécialiste de la séparation liquides/solides, décline son matériel de filtre-presse en 3 versions mobiles et modulaires, destinées en particulier aux sites de forage afin d'en valoriser les boues.

### → Trois modèles

Les eaux sont filtrées puis pressées, les "cakes" pouvant être valorisés. Environ 90 % de l'eau est ainsi récupérée.

Le nouveau matériel traite des volumes moindres que celui utilisé pour le traitement de l'eau, de boues ou de sables, à grande échelle. Ici, il s'agit de séparer des volumes de 50-100 m<sup>3</sup>/jour (modèle mobile), de 100 à 200 m<sup>3</sup>/jour (Single) ou à partir de 200 m<sup>3</sup>/jour (Twin). Le matériel passe de l'horizontale à la verticale.



Extraction de l'eau par filtre-presse dans des boues de forage, modèle Twin à partir de 200 m<sup>3</sup>/jour.

Cette adaptation, à l'étude depuis 2016 et en cours de montage en Australie pour un Twin, a reçu le trophée innovation de Sols-

cope, salon de la géotechnique, du forage et des fondations (14-15 juin, Lyon). Sept autres innovations avaient été présentées :

- Hydrofraise à grippeurs : Soletanche Bachy (mention) ;
- Détermination du diamètre des colonnes de jet-grouting : Keller (mention) ;
- Enregistreur de vibrations induites par l'être humain : Bartec Syscom et Avnir Energy ;
- Chantier sans camion : Botte Fondations ;
- Buton modulaire de 500 t : Groundforce ;
- Carrousel de forage : GTS ;
- Technologie peau de requin dans tuyaux : Jansen. ■

## 9 PARRAINS

Le trophée Solscope est attribué par un jury composé des présidents des neuf organisations professionnelles qui parrainent le salon : Comité français de la mécanique des sols et de géotechnique ; Union syndicale géotechnique ; Syndicat des entrepreneurs de sondages, forages et fondations spéciales ; Syntec Ingénierie ; Cinov, fédération des syndicats des métiers de la prestation intellectuelle conseil, ingénierie et numérique ; Comité français de la géologie de l'ingénieur et de l'environnement ; Syndicat national des entrepreneurs de puits et de forages pour l'eau et la géothermie ; Association des ingénieurs territoriaux de France ; Union française des constructeurs de machines de forage.

## HAUTS-DE-SEINE : AJOUT D'UN COLLECTEUR PARALLÈLE

Les travaux de renforcement des réseaux sous le tracé du futur tramway reliant Antony à Clamart (Hauts-de-Seine) ont démarré, notamment sur Châtenay-Malabry, située entre les deux comme Le Plessis-Robinson.

Le conseil départemental, maître d'ouvrage, améliore le réseau d'assainissement dont il a la compétence<sup>(1)</sup>. Il s'agit, sous l'avenue de la Division Leclerc, d'éviter les débordements de l'ouvrage existant, en ajoutant un collecteur neuf de 2 000 mm de diamètre (DN) sur 915 m. Le déchargement de l'existant passe par une surverse et par l'acheminement des effluents vers une section de 2 200 mm située à moins d'un kilomètre en aval.

Montant de l'opération : 16 millions d'euros.

ros. Le chantier, commencé en 2015, vient de se terminer (septembre).

### → 928 m en un seul tir

Le marché a été remporté par le groupement Sade, Bessac, Chantiers Modernes. Le département prévoyait un creusement par micro tunnelier en deux tirs avec un puits intermédiaire, les terrains étant composés de sables de Fontainebleau sur 600 m et d'argiles vertes.

Le groupement a proposé une variante avec un seul tir rectiligne de 928 m, sans puits intermédiaire. Le micro tunnelier est équipé d'une tête capable de forer aussi bien des sables (très abrasifs) que des argiles.

Le nouveau collecteur, visitable, est réalisé en tubes PRV (Hobas) ainsi que les 15 galeries perpendiculaires d'accès à

partir du trottoir. La liaison entre les deux nécessite une coque ovoïde laminée sur place (bandes de fibre de verre imprégnées de résine). ■

<sup>(1)</sup> Cf. Travaux n°924, juin 2016, page 14.



Coques ovoïdes avant pose entre le nouveau collecteur et les galeries d'accès à partir du trottoir.

## PÔLE MULTIMODAL À MOIRANS (ISÈRE)

La transformation de la gare de Moirans (Isère) en pôle multimodal s'est terminée en juillet après deux ans de travaux. Chaque jour, 1 400 voyageurs y passent pour aller travailler à Grenoble, Valence ou Lyon. Le réaménagement couvre 150 000 m<sup>2</sup>. Outre la gare, il inclut un parvis paysager, une plateforme bus, un parking extérieur de 408 places (3 niveaux), les accès pour personnes à mobilité réduite et un cheminement modes doux.

Montant des travaux : 7,4 millions d'euros HT financés en majorité par la Communauté d'agglomération du Pays Voironnais (94 000 habitants) avec les collectivités territoriales, RFF et l'État.

Les voies poids lourds sont en béton désactivé sur 25 cm d'épaisseur, formule XF4 de Cemex, résistante au climat alpin.

Le béton est produit dans une unité à côté du chantier. Le ciment vient de Grenoble. Le granulat est du Méaudre du Vercors, massif proche.



Les granulats du béton viennent du Vercors.

## MANAGEMENT DU CYCLE DE VIE

Lascom AEC entend faciliter la tâche des utilisateurs de logiciels de Project/Plant Lifecycle Management (management du cycle de vie) et de Gestion des données techniques.

Il a rédigé un guide qui simplifie la mise en place de ces outils, à partir des retours d'expériences de projets en ingénierie et en BTP.

Le document est téléchargeable après s'être identifié : [www.lascom.fr/fiches pratiques/](http://www.lascom.fr/fiches_pratiques/)

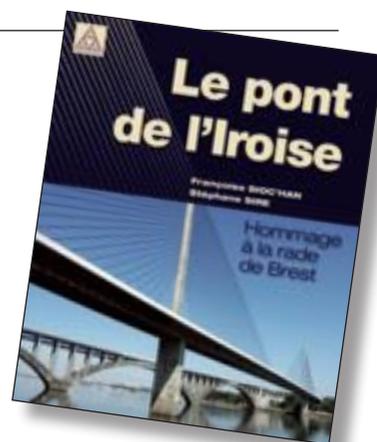
### TOUT SAVOIR SUR LE PONT DE L'IROISE

Le pont de l'Iroise, construit au début des années 1990 en rade de Brest (Finistère), continue de faire parler de lui. Un "beau livre" lui est consacré, à l'initiative de l'association Constructeurs et amis du pont de l'Iroise (Capi). Ouvrage d'art à haubans de 800 m de long, il bat, à l'époque, le record mondial de portée pour cette famille de ponts. Situé à une centaine de mètres en amont du pont en béton à arches d'Eugène

Freyssinet (1930), il en prend la relève routière. Mais ce voisinage complique les calculs des effets des vents turbulents « *extrêmement forts dans le site* » selon les termes de Christian Leyrit, directeur des Routes (1989-1999) qui préface l'ouvrage. Le Centre scientifique et technique du bâtiment étudiera en soufflerie la combinaison du pont Albert-Louppe avec celui de l'Iroise, sur maquette. Il sera décidé

d'atténuer les turbulences sur l'ancien qu'il n'était pas question de démolir. Les garde-corps pleins au sommet des arches sont supprimés et remplacés par des modèles à lames laissant passer le vent. Le livre de Françoise Sioc'han et Stéphane Sire reprend toute la genèse du projet et détaille le déroulement de la construction, avec nombre de photos et dessins.

[www.presses-des-ponts.fr](http://www.presses-des-ponts.fr) ■



### CALCUL DES STRUCTURES À POUTRES

Les 500 pages de *Calcul des ouvrages, résistance des matériaux et fondements du calcul des structures* forment un manuel pour les étudiants ingénieurs jusqu'à obtention de leur diplôme. L'auteur, Erick Ringot, enseigne en 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> cycles. Il relie modélisation et normalisation dans le calcul des structures à poutres.

L'ouvrage commence par des rappels de mécanique générale. Il aborde le calcul de statique sous la méthode newtonienne et le calcul scalaire par application du principe des puissances virtuelles. Le chapitre dédié au principe des puissances virtuelles sert de fondation aux deux méthodes de calcul des structures : celle des forces et celle des déplacements.

Divers cas de charge sont discutés. La théorie des poutres de Timoshenko, celle du cisaillement de flexion de Bredt-Jourawski et celle de la torsion de Saint-Venant sont développées. Le manuel se termine par la stabilité des équilibres en régime élastique des structures.

[www.eyrolles.com](http://www.eyrolles.com) ■



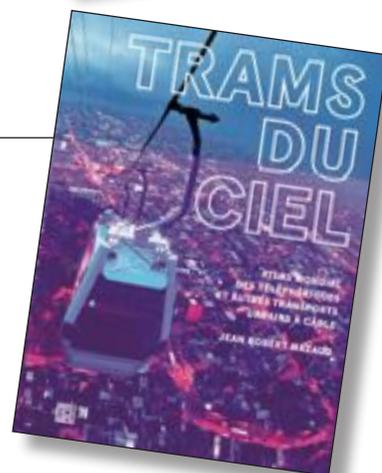
### ATLAS MONDIAL DES TÉLÉPHÉRIQUES

*Trams du ciel* vous donne des informations sur plus de 130 téléphériques, transports urbains à câble, funiculaires, ascenseurs et mini métros, à travers le monde. Au moins deux pages

sont consacrées à chaque site. L'atlas de 424 pages, à couverture rigide et en moyen format, est écrit par Jean-Robert Mazaud, architecte urbaniste, spécialiste de l'intégration du transport à

câble en ville. Son introduction de 14 pages reprend l'historique depuis l'emploi de cordes en déplacement de charges.

[www.editionsladecouverte.com](http://www.editionsladecouverte.com) ■



### DÉVELOPPER LA MÉDIATION

Recourir à la médiation plutôt qu'aller débattre au tribunal n'est pas chose courante dans le monde de la construction : 1% seulement des litiges étant résolu par cette voie, selon Fabrice Vert, conseiller à la cour d'appel de Paris, dans la préface de *La médiation à*

*l'usage des professionnels de la construction, BTP, immobilier, architecture, urbanisme*. Les raisons sont culturelles et structurelles. C'est pourquoi l'ouvrage de Vincent Borie commence par les relations entre les

acteurs y compris en revenant sur leur histoire. Le livre propose 15 fiches pratiques sur les "modes alternatifs de règlement des différends" (Mard) et donne 12 exemples réels de médiation.

[www.eyrolles.com](http://www.eyrolles.com) ■



## AGENDA

## ÉVÉNEMENTS

## • 2 AU 4 OCTOBRE

**BFUP, 3<sup>e</sup> symposium international***Lieu : Montpellier (Hérault)*[www.rilem.org](http://www.rilem.org)

## • 11 ET 12 OCTOBRE

**Renforcement des structures de génie civil (colloque Le Pont)***Lieu : Toulouse*[www.afgc.asso.fr](http://www.afgc.asso.fr)

## • 11 ET 12 OCTOBRE

**Mécanique des roches dans les pays nordiques***Lieu : Helsinki (Finlande)*[www.ril.fi](http://www.ril.fi)

## • 12 ET 13 OCTOBRE

**Écaillage du béton suite à l'exposition au feu***Lieu : Borås (Suède)*<http://conferencemanager.events/firespallingworkshop>

## • 12 ET 13 OCTOBRE

**Colloque géomécanique***Lieu : Salzbourg (Autriche)*[www.oegg.at/en/](http://www.oegg.at/en/)

## • 20 ET 21 OCTOBRE

**Sécurité incendie***Lieu : Santander (Espagne)*[www.firesafety2017.unican.es](http://www.firesafety2017.unican.es)

## • 24 AU 26 OCTOBRE

**Infrastructures souterraines en milieu urbain***Lieu : Wrocław (Pologne)*[www.ita-aites.org](http://www.ita-aites.org)

## • 26 ET 27 OCTOBRE

**Challenges en génie civil***Lieu : Ho Chi Minh City (Vietnam)*<https://cigos2017.sciencesconf.org>• 30 OCTOBRE AU 1<sup>er</sup> NOVEMBRE**Comment accroître l'espace souterrain***Lieu : Sydney (Australie)*<http://ats2017.com.au>

## • 6 AU 10 NOVEMBRE

**Batimat***Lieu : Paris Nord (Villepinte)*[www.batimat.com](http://www.batimat.com)

## • 13 AU 16 NOVEMBRE

**Congrès de l'Association française des tunnels et de l'espace souterrain***Lieu : Paris (Palais des congrès)*[www.aftes2017.com/fr/](http://www.aftes2017.com/fr/)

## • 16 NOVEMBRE

**Assises nationales de l'éolien terrestre***Lieu : Paris (Maison de la chimie)*[www.enr.fr](http://www.enr.fr)

## • 21 AU 23 NOVEMBRE

**Salon des maires***Lieu : Paris (Porte de Versailles)*[www.salondesmaires.com](http://www.salondesmaires.com)

## • 27 AU 29 NOVEMBRE

**8<sup>e</sup> assises nationales de l'environnement sonore***Lieu : Paris (Cité des sciences et de l'industrie)*[www.bruit.fr](http://www.bruit.fr)

## • 6 AU 8 DÉCEMBRE

**Conférence Stuva (tunnels et infrastructures)***Lieu : Stuttgart (Allemagne)*[www.stuva-conference.com/en/](http://www.stuva-conference.com/en/)

## NOMINATIONS

**AXE MÉDITERRANÉE :**

Jean-Christophe Baudouin a été nommé délégué interministériel au développement de l'axe portuaire et logistique Méditerranée Rhône Saône (Commissariat général à l'égalité territoriale, service du Premier ministre).

**CANAL SEINE NORD EUROPE :**

En mai, Jérôme Dezobry, Cyril Forget et Marc Papinutti ont été nommés membres du directoire de la Société du CSNE, M. Papinutti le présidant. Depuis, ce dernier est devenu directeur du cabinet d'Élisabeth Borne, ministre des Transports. Il est remplacé, temporairement par Cyril Forget.

**CEMEX FRANCE :**

Marcelo Catala prend la succession du président Michel André qui, lui, occupe désormais la même fonction à Cemex au Royaume-Uni.

**COLAS :**

Éric Haentjens devient secrétaire général du groupe. Il remplace Thierry Montouché, retraité.

**EIFFAGE CONSTRUCTION :**

Philippe Content devient directeur général adjoint après avoir été un des deux directeurs régionaux Île-de-France, poste où il est remplacé par Mathias Lalande. Il succède à Olivier Genis devenu PDG suite au départ en retraite de Michel Gostoli.

**ÉQUIPEMENTS ROUTIERS :**

Aly Adham succède à Jean-Bernard Conrad à la présidence du Syndicat des équipements de la route.

**IDRRIM :**

Magali Dupetit est chargée de développer l'Observatoire national de la route à l'Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité.

**LAFARGE HOLCIM :**

Éric Olsen, PDG, ayant donné sa démission, effective en juillet, est remplacé par Jan Jenisch, directeur général de Sika, qui prendra ses fonctions à la mi-octobre.

**NUMÉRIQUE :**

Hélène Brisset dirige le cabinet du secrétaire d'État chargé du numérique, Mounir Mahjoubi.

**SNBPE :**

Azziz Ouattou a été élu président de la commission développement du Syndicat national du béton prêt à l'emploi, à la suite d'Alain Camus.

**SYSTRA :**

Didier Traube est nommé directeur adjoint France, chargé des opérations et du développement des activités et de la relation sociale.

**TRANSITION ÉCOLOGIQUE :**

Nicolas Hulot, ministre, a choisi Michèle Pappalardo pour diriger son cabinet.

**UNICEM :**

Nicolas Vuillier prend la présidence de l'Union des industries des carrières et matériaux de construction à la suite de Michel André. Sylvie Lebreton est la 1<sup>re</sup> présidente de l'association Entreprises engagées (environnement et RSE).

**USIRF :**

Pierre Calvin remplace Jacques Tavernier à la présidence de l'Union des syndicats de l'industrie routière française.

## FORMER LES PLOMBIERS DU NUMÉRIQUE

Une formation en alternance rémunérée de technicien du numérique débute ce mois-ci. Destinée à faire de jeunes sans diplôme des "plombiers du numérique", elle comprend 3 modules : déploiement de la fibre optique, rack et câblage d'un data center et administration d'un réseau simple.

Elle a lieu à l'École de la deuxième chance de Chelles (Seine-et-Marne) qui bénéficie de financements de l'État et des collectivités locales, et est soutenue par le fonds Impala Avenir.

La Fédération des industries des réseaux d'initiative publique y est associée. Il s'agit de former le personnel nécessaire aux objectifs de l'État en matière de très haut débit.

# UNE ARCHITECTURE CONTEMPORAINE IMPLIQUÉE DANS LE PAYSAGE HISTORIQUE

CÉDANT SOUVENT À UNE TENTATION ÉGOCENTRIQUE RENFORCÉE PAR L'OMNIPRÉSENCE DE L'IMAGE DANS TOUS LES DOMAINES, Y COMPRIS DE LA CRÉATION, CERTAINS ARCHITECTES SEMBLENT SE PRÉOCCUPER DAVANTAGE DE LEUR CÉLÉBRITÉ PERSONNELLE QUE DE LA CRÉATION DE PROJETS NOVATEURS. **TEL N'EST PAS LE CAS DE MARC MIMRAM, INGÉNIEUR, ARCHITECTE ET PHILOSOPHE.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



MARC MIMRAM, INGÉNIEUR, ARCHITECTE ET PHILOSOPHE, AUTEUR D'UNE ŒUVRE RÉSOLUMENT CONTEMPORAINE N'HÉSITE PAS À FAIRE APPEL AUX TECHNIQUES LES PLUS AVANCÉES TOUT EN S'ANCRANT DE FAÇON RÉVOLUE DANS LE PAYSAGE, QU'IL SOIT GÉOGRAPHIQUE OU HISTORIQUE, ÉLEVANT AINSI LA DISCUSSION ARCHITECTURALE AU NIVEAU PHILOSOPHIQUE.

CE SONT QUELQUES-UNES DE SES ŒUVRES RÉCENTES QUE MARC MIMRAM A CHOISI DE COMMENTER ICI ET QUI CONSTITUENT UNE SYNTHÈSE SIGNIFICATIVE DE SON APPROCHE ARCHITECTURALE.

**En tant qu'ingénieur, architecte et philosophe, vous occupez une place bien particulière dans le paysage architectural français. Quelle est votre philosophie de l'architecture ?**

Ma philosophie se base sur quelques fondements.

Le premier d'entre eux est évidemment la rationalité. Je suis ingénieur et architecte et mon travail se fonde sur une certaine raison des choses.

Cette rationalité a pour particularité, en ce qui me concerne, d'être plurielle. Ce n'est pas une raison uniquement calculatoire. Elle peut venir de différentes origines.

Certaines, particulièrement importantes ; la statique, la géographie avec l'orientation dans le paysage, la lumière, les saisons, et aussi la raison constructive. La matérialité bien sûr, c'est-à-dire l'expression de la matière et le sens que l'on a de son usage

FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 © JULIEN LANOO - FIGURE 3 © IDA +



1- Marc Mimram, ingénieur, architecte et philosophe.

2- L'École Nationale d'Architecture de Strasbourg (ENSAS).

3- L'ensemble immobilier Panorama, au-dessus des voies ferrées de la gare d'Austerlitz à Paris.

4- Le nouveau « Court des Serres » de Roland Garros prend place dans le jardin, à l'emplacement de serres de mauvaise facture.

5- Le Court des Serres de Roland Garros est encadré d'une serre continue qui dialogue avec celles de Jean-Camille Formigé.

## MARC MIMRAM : REPÈRES

Né à Paris en 1955, Marc Mimram est maître ès-sciences mathématiques de l'Université de Paris VII (1976), ingénieur diplômé de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (1978), titulaire d'un « master in civil engineering » de l'Université de Berkeley (1979), architecte DPLG de l'École Nationale Supérieure des Beaux-Arts à Paris (1980) et d'un DEA de philosophie de l'Université de Paris I Panthéon-Sorbonne (1982).

Chevalier de la Légion d'honneur (2010), Chevalier de l'ordre national du Mérite (2005) et Chevalier des Arts et Lettres (2000), il développe, depuis 1981, au sein d'une même structure, une double activité de bureau d'études et d'architecte-ingénieur.

Il est, en tant qu'architecte-ingénieur, l'auteur de nombreux ouvrages d'art et de projets architecturaux en France et à l'étranger : la passerelle Solfério à Paris (prix de l'Équerre d'argent en 1999), les ponts de Feng Hua et Beng Bu à Tianjin en Chine (2006-2007), la passerelle sur le Rhin entre Strasbourg et Kehl (prix Renault traffic design award en 2005), le pont Hassan II à Rabat au Maroc (prix Aga Khan d'architecture en 2013).

Il a construit un grand nombre d'équipements sportifs et culturels, tels la piscine-patinoire Pailleron à Paris (2006) la piscine des Ulis (2007), la piscine du pays de Morlaix (2008), le centre aquatique du Val d'Europe (2012) ou l'École Nationale d'Architecture de Strasbourg (trophée Eiffel 2015).

Marc Mimram a enseigné à l'École des Ponts et Chaussées, à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne et à l'Université de Princeton (États Unis). Il a été nommé Professeur des Écoles d'Architecture et enseigne actuellement à l'École d'Architecture de Marne-la-Vallée en Seine et Marne.

incluant l'innovation technologique au travers de laquelle nous avons développé la plupart de nos projets. D'un point de vue philosophique, l'économie de matière et la manière de la mettre en œuvre dans un monde où la question de l'origine des matériaux et la transformation de la planète, me paraissent être au cœur du dispositif. Notre travail s'intéresse tant à l'architecture qu'à la conception des structures : les structures construites, celles des ouvrages d'arts et du territoire. Nous avons toujours considéré que l'architecture ne pouvait s'absenter du champ de la construction et que

celle-ci devenait un déterminant du projet tant pour sa conception que pour son exécution : le projet exprime ainsi l'accumulation d'un travail partagé, le chantier un lieu de mémoire, la construction un vaste processus de transformation. Cette transformation trouve son origine dans l'usage même de la matière : de l'extraction du minerai au façonnage de la tôle d'acier, de l'exploitation forestière aux structures en bois lamellé-collé, de la carrière de concassage aux ossatures en béton armé, des mines de bauxite aux profilés d'aluminium extrudé.

Partout le grand paysage est façonné par ce processus industriel qui place la construction au centre de cette transformation.

Mais le projet est aussi le révélateur de cette transformation ; en se fondant sur la rationalité des choix organisés autour d'une trilogie - géométrie - statique - chantier, le projet devient un outil raisonné de la transformation de l'espace.

### L'École Nationale d'Architecture de Strasbourg en est-elle un exemple ?

L'école d'architecture de Strasbourg a été réalisée sur un dispositif structurel

particulier qui permet de libérer le sol grâce à des poutres mixtes qui sont à la fois des poutres Vierendeel et des poutres treillis.

La partie visible du bâtiment est composée de trois volumes qui semblent « flotter » l'un au-dessus de l'autre. Nous utilisons des outils de calcul non pas pour la rationalité la plus efficace en soi, détachée du réel, mais au contraire pour développer des projets qui sont toujours spécifiques.

C'est vrai pour les ouvrages d'art mais cela s'applique également aux bâtiments pour lesquels je tiens à ce que la structure soit toujours un élément constructif.

À Strasbourg, je voulais que le dialogue s'instaure ici à la fois par les ouvertures qui, dans chacune des salles, inscrivent l'horizon urbain dans le regard des étudiants et par l'ouverture sur l'espace public et le décolllement du sol.

La résille d'aluminium déployé se développe comme un rideau qui unifie le bâtiment, tout en maintenant la transparence et l'ouverture sur la ville.

### Pour l'ensemble immobilier Panorama au-dessus du faisceau de voies de la gare d'Austerlitz, vous remettez à l'honneur une conception historique des ouvrages d'art urbains.

L'infrastructure peut être reconquise soit à travers des ouvrages tels que des passerelles ou des ponts mais aussi de ponts habités.

C'est le cas de cet ensemble sur l'avenue de France au-dessus des voies de chemin de fer de la gare d'Austerlitz. J'ai proposé de substituer à une dalle classique qui aurait formé une *tabula nova* onéreuse et abstraite un pont habité qui passe au-dessus des voies sur une portée de 58 m. ▶

© ARTEFACTORY

4



© ARTEFACTORY

5



## LA PASSERELLE SOLFÉRINO : COMME UN BALCON SUR LA VILLE

L'un des premiers projets de Marc Mimram qui suscita l'intérêt du grand public fut la passerelle Solférino sur la Seine, en 2000, située entre le Musée d'Orsay, en rive gauche, le Louvre et le Jeu de Paume, en rive droite. Voici ce que dit Marc Mimram à son sujet<sup>(\*)</sup>, alors qu'aujourd'hui, cet ouvrage donne le sentiment d'avoir toujours été là, ce qu'il prend pour un compliment :

« Le projet de la passerelle Solférino fixe le moment magique de la rencontre avec la ville historique, son fleuve et sa géographie.

Ici, la conception se fonde sur une attention au lieu, au façonnage de la matière, aux capacités de la géométrie à exprimer le schéma statique.

La structure accompagne les parcours dans leurs multiplicités, elle met au centre du dispositif un espace public offert à tous, comme un balcon sur la ville.

Et puis, pour donner une notion de légèreté à l'arc de 106 m de portée, j'ai proposé d'utiliser de la tôle très épaisse - 14 cm - façonnée, découpée et réassemblée le long d'une poutre Viereendeel aux membrures soudées, sans diagonale, afin de trouver un vocabulaire qui échappe au rivetage du 19<sup>e</sup> siècle et fasse écho aux assemblages contemporains.

Les bracons façonnent un volume virtuel dans lequel on pénètre pour rejoindre les quais ».

(\*) Extrait de « Marc Mimram : architecture et structure », Philip Jodidio, Prestel Verlag.



6

© CHRISTIAN RICHTERS



7

© CHRISTIAN RICHTERS

Quatre appuis d'un côté et deux de l'autre permettent, avec deux franchissements longitudinaux et deux franchissements transversaux de libérer totalement l'espace. Cet ouvrage associe une contrainte structurelle et une idée architecturale qui aboutit à la création de bureaux avec des balcons, des terrasses et des loggias dans les parties portées et suspendues de la structure ouverts sur l'horizon figurant une domesticité du tertiaire.

Le bâtiment offre un panorama sur la ville. Le pont habité construit une structure civile et généreuse qui met l'horizon en partage.

La contrainte structurelle devient un atout dans la transformation des espaces de bureaux et leur ouverture sur la ville.

### La rénovation et l'extension de Roland Garros à Paris ont fait l'objet d'une vive polémique. Que répondez-vous à ses détracteurs ?

La polémique suscitée par la modernisation de Roland Garros était totalement injustifiée. On a prétendu que les serres de Jean-Camille Formigé allaient être détruites. Si tel avait été le cas, je n'aurais jamais accepté de réaliser

ce projet. Je me suis moi-même battu pour la conservation de la Halle Freyssinet à Paris et pour le marché couvert de Nicolas Esquillan à Fontainebleau. Je me suis toujours battu pour la préservation des bâtiments historiques des grands architectes ou ingénieurs. Le projet sera construit à la place de serres en plastiques et en aluminium de mauvaise facture construites dans les années 1960.

Le nouveau stade de 5 000 places sera encaissé dans le sol et ceint de 1 400 m<sup>2</sup> de nouvelles serres qui dialogueront avec celles de Formigé. Il y aura plus de serres après qu'il n'y

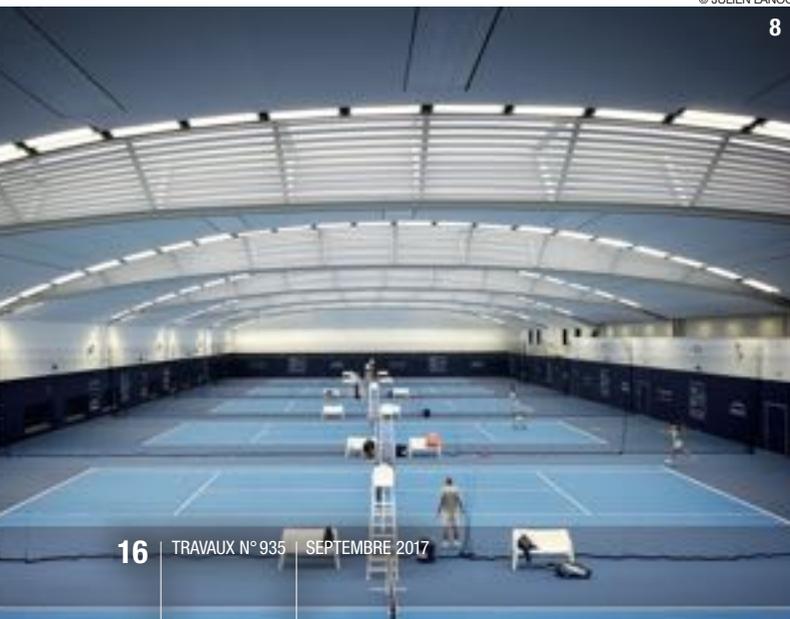
en avait avant et elles seront techniquement plus performantes.

La modernisation de Roland Garros se fonde, d'une part, sur l'ouverture du stade sur la ville et, d'autre part, sur le partage entre les nouveaux espaces publics construits et le jardin des serres d'Auteuil.

Nous construisons ici deux bâtiments importants : le Centre National d'entraînement (CNE) et le Court des Serres. Le CNE dispose de sept courts couverts de très haute technicité pour lequel nous avons construit une halle unitaire dont la structure devient un filtre à lumière qui met les joueurs en

© JULIEN LANOO

8



© IDA +

9



contact avec le monde sans jamais les éblouir.

Le nouveau court prend place dans le jardin, à l'emplacement des serres horticoles de 1960.

**La nouvelle gare TGV de Montpellier est la première à avoir été confiée à un architecte extérieur à l'AREP<sup>(1)</sup>, communément appelée « l'agence des gares » de la SNCF ? Dans quel esprit l'avez-vous conçue ?**

La nouvelle gare de Montpellier a pour particularité, comme l'ensemble immobilier « Panorama » de la ZAC Paris Rive Gauche, d'être un pont habité au-dessus des voies de chemin de fer, relié à la ville, d'un côté par un parvis ombragé abritant également la gare routière et de l'autre par le terminus du tramway.

Elle diffère radicalement, dans sa conception, des gares du XIX<sup>e</sup> siècle, particulièrement marquées par le rapport entre le verre et l'acier, tant pour des raisons de volume - à cause des locomotives à vapeur - que par la découverte, pour l'acier, de ce matériau à l'occasion de la construction des grandes halles et des bâtiments de l'Exposition Universelle de 1889. Nous avons conçu une gare méditerranéenne composée de grandes coques en BFUP de 5 cm d'épaisseur et de 18 m de portée dans un sens habillant une structure de 100 m x 80 m. Ces 115 « palmes » font office de filtre de lumière. C'est la première fois que le dispositif du toit de la gare aura la double fonction de structure et de couverture. Des blocs de verre sont insérés dans les coques afin de permettre à une lumière filtrée de passer à l'intérieur. C'est comme une pluie de lumière avec des d'ouvertures adap-

tées et différenciées au nord et au sud. Ceci m'amène à parler d'une autre manière de reconsidérer l'histoire. Les grandes structures en béton telles qu'on les faisait au 20<sup>e</sup> siècle ne sont plus possibles à réaliser pour des raisons économiques. Elles nécessitent la mise en œuvre de coffrages très importants pour y couler, en définitive, très peu de matière, ce qui nécessite beaucoup de main d'œuvre.

Nous renouons malgré tout avec cette tradition grâce aux nouveaux matériaux tels que le BFUP qui auto-

risent la réalisation de voiles minces et grâce à la préfabrication en usine.

**Quelle est votre approche dans le domaine des ouvrages d'art ?**

Dans le domaine des ouvrages d'art et celui des infrastructures, cette articulation de projet autour de la trilogie - géométrie - statique - chantier - est déterminante. Elle doit permettre d'éviter l'abstraction technocratique dans laquelle se construisent les projets à grande échelle sur le territoire : le pont n'est pas un simple franchissement, la route n'est pas un ruban d'asphalte accueillant un flux migratoire. Ici, aussi le projet doit trouver sa cohérence dans la lecture des échelles du paysage, dans le parcours d'une géographie informée d'histoire. Alors le pont devient une promenade en balcon sur le fleuve, la route un travelling à travers les déterminants de la géographie.

**C'est la démarche que vous avez appliquée au pont Hassan II au Maroc qui vous a d'ailleurs valu le prix Aga Khan en architecture en 2013.**

Ce pont reliant Rabat et Salé s'inscrit dans le site historique très important de la kasbah des Oudayas, de la citadelle de Salé et de la médina de Rabat mais aussi de la tour Hassan, datant du 12<sup>e</sup> siècle, près de laquelle a été érigé dans les années 1960 le mausolée Mohammed V.

J'ai voulu qu'il s'inscrive dans le sol plutôt que dans le ciel afin de relier les deux villes sans imposer un élément intrusif qui irait en concurrence avec l'horizontalité du milieu urbain et fluvial. Il comporte deux parties : une partie centrale en béton de ciment blanc constituée de voûtes précontraintes de géométrie progressive, aboutissant à

une voûte centrale, préfabriquées sur le site, et un viaduc très sophistiqué d'une longueur de 600 m, également préfabriqués, constituant un espace public sous un toit abritant un marché, un lieu de rencontre, un abri pour les sportifs, une promenade diurne et nocturne. La structure est mise au service de la légèreté, de la transparence et de la réappropriation. Le prix d'architecture de l'Aga Khan a souligné le caractère sensible et social de cet ouvrage qui transforme la contrainte infrastructurelle en bénéfice urbain pour tous. On retrouve cette idée pour le prolongement de la ligne 11 du métro parisien entre le plateau de Montreuil et la gare de Rosny-sous-Bois. Pour la première fois depuis la réalisation de la ligne 6 au début des années 1900, le métro parisien sort enfin de terre, bénéficiant de la topographie pour ouvrir la vue sur le paysage et constituer un viaduc de 600 m de long autour d'une nouvelle station aérienne. L'idée était de construire un espace public sous le métro aérien, en toit, en utilisant, par ailleurs, la technologie du 19<sup>e</sup> siècle de piles en fonte d'acier pour la réintroduire au 21<sup>e</sup> siècle de manière très contemporaine. Ces pièces qui servent d'appui sont coulées dans l'atelier de fonderie britannique Cook dans des moules en sable à partir de modèles que nous avons réalisés sur maquette numérique. Cet ouvrage illustre une autre manière de regarder l'histoire à travers l'évolution des technologies en installant un dialogue entre un savoir-faire historique et le travail des hommes aujourd'hui. Les situations de fabrication dans le monde connaissent de nombreuses transformations par l'arrivée de la découpe chimique, de la découpe numérique, de la modélisation tridimensionnelle, de la maquette 3D. ▷

**6- « On me dit que la passerelle semble avoir toujours été là ».**

**7- Les bracons de la passerelle Solférino façonent un volume virtuel dans lequel on pénètre pour rejoindre les quais.**

**8- Le Centre National d'Entraînement (CNE) à Roland Garros.**

**9- La gare TGV Montpellier Sud de France : des coques en béton fibré ultra performant.**

**10- Le prolongement de la ligne 11 du métro parisien.**

**11- La structure du pont Hassan II est mise au service de la légèreté, de la transparence et de la réappropriation.**

© AGENCE TU VERRAS

10



© AGENCE MIMRAM

11





12

© FU XING

Toutes ces situations sont très nouvelles mais, en même temps, elles renvoient à des savoir-faire qui peuvent être historiques.

**Vous avez construit ces dernières années un grand nombre d'ouvrages en Chine qui respectent eux aussi les caractéristiques du site. Quelle a été votre approche pour les ponts de Zhong Sheng Da Dao et de Jin Liu Lu ?**

Le premier est situé à Tianjin au-dessus d'un lac artificiel de la ville nouvelle Sino-Singapour et ne présentait pas de contrainte de gabarit de navigation. J'ai considéré qu'il fallait être au contact de l'eau et, dans un paysage étendu et plan, en dialogue avec l'horizon. L'ouvrage donne l'impression de flotter sur le lac, de jour comme de nuit.

Il s'agissait ici de retrouver un dispositif constructif de voiles continus en béton armé à double courbure créant de grandes vasques de 54 m de portée, répétées 10 fois sur une longueur totale de 460 m incluant les viaducs d'accès.

Le dispositif constructif est né de la rencontre avec le responsable chinois des coffrages, et a été mis au point par l'échange numérique des modèles entre l'agence à Paris et l'entreprise en Chine. Il s'agissait de mettre au point un coffrage très complexe de très grande taille et de le rendre

démontable et réutilisable facilement. On retrouve là le dialogue entre la géométrie et l'outil de construction. L'ouvrage est le résultat d'une intelligence croisée entre l'entreprise de fabrication du coffrage chinoise et notre méthode de conception géométrique.

Nous avons réintroduit la technologie des grandes coques à l'aune des conditions de production locales, ce qui n'est évidemment plus possible économiquement en France.

Nous avons repris le même dispositif pour le pont de Jin Liu Lu qui se trouve un peu plus loin sur le même lac. Comme un jeu de résonance, les deux ponts sont en dialogue, l'un en béton dans la continuité des coques, l'autre en acier dans la transparence de grande feuilles plissées, variant au gré de la distribution des efforts pour constituer un long ruban à double courbure qui flotte au-dessus du lac.

Une autre réalisation en Chine illustre l'utilisation que nous avons faite du savoir-faire spécifique de la chaudronnerie navale et industrielle de Yangzhou, une ville située à 300 kilomètres de Shanghai. La passerelle Liu Shu est née d'une rencontre avec la mairie de la ville et son désir urgent de construire un ouvrage en moins de six mois, pour l'anniversaire de la ville.

Le projet a été conçu en quelques heures à partir d'un schéma statique avec un arc bi-encasté et la mise en forme d'une feuille d'acier qui exprime

**12- Le pont de Zhong Sheng Da Dao s'installe au-dessus d'un lac artificiel.**

**13- La passerelle Liu Shu dans la ville de Yangzhou.**

**14- La piscine « Aquasport » de Mantes-la-Ville.**

par sa variation d'inertie celle des flexions qui cheminent, en passant par deux points de moments nuls. Le caisson se soulève, se tend, se redresse au centre de la passerelle pour créer une place protégée et suit le mouvement inverse jusqu'à l'autre rive.

**Quel regard portez-vous sur l'architecture aujourd'hui et, au-delà, comment entrevoyez-vous son évolution ?**

Hier, il fallait construire pour le plus grand nombre, aujourd'hui on construit pour le déplacer, la valeur du temps prend le pas sur la géographie. Gagner du temps semble signifier perdre le rapport au sol, être en extraterritorialité : une dématérialisation s'opère.

Pour éviter les erreurs d'hier, il faut que ces transformations majeures ne soient pas réduites à leurs valeurs techniques, il nous faut retrouver les qualités sen-

sibles du regard sur le paysage, les qualités construites des ouvrages d'art, les qualités de partage sur le territoire commun.

La pensée sur la ville, comme la pensée sur le territoire semblent s'abstraire dans les imageries mathématiques : chaos pour les uns, anamorphoses temporelles de la géographie pour les autres, réseaux virtuels pour tous. A contrario, c'est l'attention sensible des lieux, la valeur des lumières, les plaisirs de la gravité et des matières mises en œuvre qui pourraient assurer la générosité de l'espace partagé.

Les projets que nous avons réalisés s'installent dans l'hypothèse du lien en créant des lieux partagés, en mettant toujours l'espace public au centre du dispositif architectural et urbain.

À l'époque du numérique, il ne s'agit pas d'installer l'architecture dans un monde virtuel coupé de sa réalité physique et sociale, mais bien au contraire de s'approcher du réel, toujours davantage.

Être dans le concret pour être dans le réel, être dans le réel pour être plus près de ceux qui le mettent en œuvre et ainsi appartenir à l'unité du monde que nous transformons. □

1- **Arep** : créé en 1997 au sein du groupe SNCF par Jean-Marie Duthilleul et Étienne Tricaud, architectes et ingénieurs, le groupe AREP conçoit les espaces fréquentés par les foules à toutes les échelles, du grand territoire métropolitain à celle du mobilier public, du bâtiment à celle du quartier de ville.

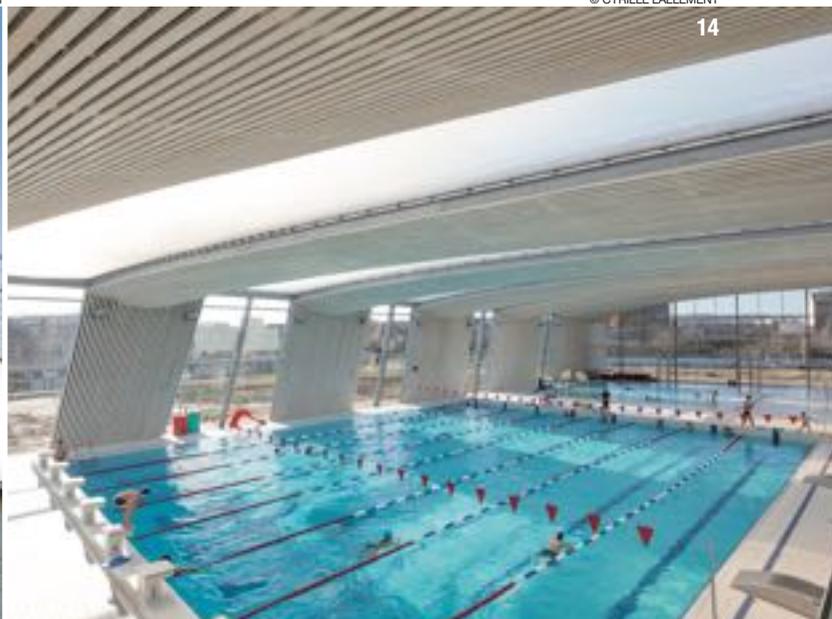
© AGENCE MIMRAM

13



© CYRILLE LALLEMENT

14



# BON DE COMMANDE

WWW.REVUE-TRAVAUX.FR

1917 | 2017  
LA REVUE  
**TRAVAUX**  
A 100 ANS

OFFRE 100 ANS\* :  
PAR NUMÉRO  
**10€**  
AU LIEU DE 25€

À renvoyer à : 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

**OUI**, je souhaite commander des numéros séparés de la Revue **TRAVAUX**

Numéro de la revue	Date de parution	Quantité
Nombre total d'exemplaires >		

Au tarif de :

- 10 € l'exemplaire (moins de 20 exemplaires), soit : \_\_\_\_\_ numéros x 10 € = \_\_\_\_\_ €
- 9 € l'exemplaire (du 21<sup>e</sup> au 100<sup>e</sup> exemplaire), soit : \_\_\_\_\_ numéros x 9 € = \_\_\_\_\_ €
- 8 € l'exemplaire (du 101<sup>e</sup> au 500<sup>e</sup> exemplaire), soit : \_\_\_\_\_ numéros x 8 € = \_\_\_\_\_ €

## JE VOUS INDIQUE MES COORDONNÉES :

Nom \_\_\_\_\_ Prénom \_\_\_\_\_

Entreprise \_\_\_\_\_ Fonction \_\_\_\_\_

Adresse \_\_\_\_\_

Code postal [ ] [ ] [ ] [ ] [ ] Ville \_\_\_\_\_

Tél. : \_\_\_\_\_ Fax : \_\_\_\_\_

Email : \_\_\_\_\_  Merci de ne pas communiquer mon adresse mail.

Je joins mon règlement d'un montant de \_\_\_\_\_ € TTC par  Chèque à l'ordre de COM\*1 ÉVIDENCE

Je réglerai à réception de la facture

Je souhaite recevoir une facture acquittée

Date, signature et cachet de l'entreprise obligatoire



© COSEA

**TECHNOSOL**

# L'INGÉNIERIE AU SERVICE DE LA GÉOTECHNIQUE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

**TECHNOSOL EST UN BUREAU D'INGÉNIERIE INDÉPENDANT POSSÉDANT PRÈS DE 45 ANS D'EXPÉRIENCE DANS LE DOMAINE DE LA GÉOTECHNIQUE. LA SOCIÉTÉ EXERCE SON ACTIVITÉ ESSENTIELLEMENT DANS LA RÉGION PARISIENNE ET EN NORMANDIE, AVEC DES INCURSIONS PONCTUELLES AU-DELÀ, DANS LE CADRE DE MISSIONS D'INGÉNIERIE À FORTE VALEUR AJOUTÉE EN FRANCE, PAR EXEMPLE SUR LA LIGNE À GRANDE VITESSE SEA TOURS - BORDEAUX, VOIRE À L'ÉTRANGER, AU MEXIQUE OU EN MAURITANIE.**

**M**ichaël Reboul, directeur général de Technosol, nous présente cette société qui a connu une évolution très significative depuis 2011, passant d'une activité essentiellement "bâtiment" à une expertise reconnue en génie civil, ainsi qu'en témoignent ses références les plus récentes. Technosol est l'une des entités du groupe JEI qu'elle a rejoint en 1999. Le groupe JEI a été fondé en 1993 et emploie actuellement 280 collaborateurs. Il a réalisé en 2016 un chiffre d'affaires de 31 millions d'euros. Son siège est à Palaiseau.



© TECHNOSOL

La préservation du patrimoine construit est à l'origine l'idée fondatrice du groupe bâti par Jacques Ergand. Tout naturellement, cela l'a conduit à s'intéresser à l'environnement dans lequel les ouvrages s'insèrent et aux concepts et techniques de construction et développement durables. C'est ainsi qu'aujourd'hui le groupe JEI assure des services complets dans les domaines de la construction durable et de la réparation, de la gestion de l'environnement, des projets d'aménagement et des énergies renouvelables. Il est constitué d'entités spécialisées dans deux secteurs d'activités - l'ingé-

nerie et les travaux - qui interviennent indépendamment ou en synergie tant d'un point de vue humain que fonctionnel dans la construction, la réparation et l'amélioration du patrimoine : JEI Entreprise et JEI Ingénierie.

JEI Entreprise regroupe les activités de travaux et de construction, de réparation de structures et de reprise en sous-œuvre au sein de trois entités (Chanin, Spirale et Chanin BTP).

Les compétences des sociétés de JEI Ingénierie apportent à leurs clients le conseil et l'expérience de spécialistes en géotechnique (Technosol), hydrogéologie et géothermie (Geother), calcul et pathologie des structures (IPC), environnement et aménagement (Iddea), et maîtrise d'œuvre tous corps d'état (Setecba).

Forensol, filiale et sous-traitante de Technosol, regroupe l'ensemble des moyens matériels et humain d'investigation du groupe. Son cœur de métier, et sa raison d'être, sont d'apporter son savoir-faire dans la mise en œuvre des programmes d'investigations géotechniques définis par l'ingénierie.

## BUREAU D'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE DU GROUPE JEI

Technosol emploie 43 personnes dont 23 ingénieurs géotechniciens et 12 techniciens spécialisés. Elle dispose de quatre implantations : le siège social est à Ballainvilliers (91), le laboratoire de mécanique des sols est à Palaiseau (91), et deux agences sont présentes en Normandie, à Carpiquet (14) et Rouen (76). Sa société sœur Forensol emploie près de 40 personnes réparties dans 15 équipes de sondages.

« Notre expérience démontre, année après année, précise Michaël Reboul, que cette organisation reposant sur un bureau d'études dédié à l'ingénierie et à la gestion de projet, s'appuyant sur une filiale spécialisée sur son métier d'investigations des sols, au service exclusif des bureaux d'études du groupe, est, pour les maîtres d'ouvrage, une garantie de qualité et de réactivité dans la conduite de leurs projets. Ceci se traduit notamment par le nombre et l'importance des marchés à bons de commande dont Technosol est titulaire et, surtout, le fait que ceux-ci soient régulièrement renouvelés ».

« Technosol apparaît ainsi comme un partenaire majeur des projets d'aménagement en Île-de-France et en Normandie, capable de coopérer dans des relations de confiance établies dans la durée avec les donneurs d'ordre les plus importants ».

© MARC MONTAGNON



## MICHAËL REBOUL : PARCOURS

**Michaël Reboul est diplômé de l'École Centrale de Paris, promotion 2003, option Aménagement et Construction.**

**Il commence sa carrière chez Terrasol où il évolue, de 2003 à 2011, du poste d'ingénieur d'études, vers la responsabilité technique et financière de projets d'ingénierie géotechnique et l'encadrement et la formation d'ingénieurs juniors.**

**Au sein de Terrasol, il participe à plusieurs grands projets en France et à l'international (traversée souterraine de Toulon, terminal LNG de Dunkerque, champ d'éoliennes à Ashegoda en Éthiopie...), tout en s'impliquant au sein de la communauté scientifique (il fut ainsi représentant de la France au Congrès International des Jeunes Géotechniciens YGEC en 2009 à Alexandrie en Égypte).**

**Le souhait de se rapprocher des problématiques de terrain et l'opportunité de contribuer à un ambitieux projet de développement le conduit à rejoindre Technosol en 2011 en tant que Directeur de l'Ingénierie avec mission de développer les compétences de la société en matière d'ingénierie. C'est ainsi sous son impulsion que Technosol a traité avec succès la majorité des projets cités ici.**

**Il est nommé Directeur Général Adjoint de Technosol en 2015 puis Directeur Général depuis juin 2016.**

**Michaël Reboul est également Directeur Général de Forensol et membre du Comité Exécutif du Groupe JEI.**

**1- Le viaduc de Charente Nord sur la SEA Tours-Bordeaux.**

**2- Le laboratoire de Technosol à Palaiseau.**

**3- Michaël Reboul, directeur général de Technosol.**

L'entreprise fêtera cette année ses 45 ans d'existence. Pendant longtemps, elle est intervenue presque exclusivement sur des projets de bâtiment de petite à moyenne taille. Depuis le début des années 2010, elle s'est orientée vers des projets complexes et ambitieux de génie civil en liaison avec les

réalisations des grandes entreprises - Bouygues, Demathieu Bard, Razel-Bec, Vinci... - mais aussi avec les projets des grands donneurs d'ordre publics et privés. Pour en citer quelques-uns : SIAAP (assainissement de la région parisienne), SNCF, RATP, Epadesa (aménagement de La Défense - Seine Arche), Areva (La Hague), Société du Grand Paris...

La dynamique de développement vers d'autres types de marchés lui a permis de faire progresser son chiffre d'affaires de 7 millions d'euros en 2010 à plus de 10 millions en 2016, tandis que le nombre des ingénieurs était porté de 14 à 23 sur la même période et que leur activité comprend aujourd'hui une forte part de missions d'ingénierie calculatoire et de suivi de travaux en

plus de missions d'organisation et de synthèse de campagne de reconnaissances.

L'entreprise se tourne aujourd'hui vers tous les grands projets d'aménagement de la région parisienne, les projets de bâtiment et de génie civil complexes et des missions diversifiées de suivi de travaux : terrassements, micro-tunnellers, fondations sur pieux, inclusions, soutènements...

## TROIS AXES DE DÉVELOPPEMENT

Cette dynamique de développement s'inscrit selon trois axes majeurs :

→ Les grands projets ;

→ Les projets à forte valeur ajoutée technique ;

→ Les projets caractérisés par des contraintes extérieures fortes.

« La première réussite de Technosol dans les grands projets d'infrastructure linéaire fut, en 2011, notre intervention dans le cadre de la LGV SEA Tours-Bordeaux pour la réalisation des sondages et des études d'exécution de trois viaducs et de 60 ouvrages d'art courants » indique Michaël Reboul. « La création de notre cellule Grands Projets nous a permis, depuis 2012, d'intervenir pour les reconnaissances de la phase G2 du prolongement vers le nord, puis vers le sud, de la ligne 14 du métro parisien, de participer aux reconnaissances géotechniques de la ligne 15 Sud du futur Grand Paris Express, tronçon Villejuif-Pont de Sèvres, ou bien encore de prendre en charge la campagne de reconnaissances puis les études pour un ouvrage hydraulique profond de 9 km de longueur pour le compte de l'Aéroport de Paris ».

Le développement au sein de Technosol de l'ingénierie et de l'utilisation des outils de modélisation a ouvert la voie vers des projets ambitieux à forte valeur ajoutée technique, parmi lesquels :

→ La tour Skylight à Puteaux (IGH R + 18) au-dessus des voies de la ligne A du RER avec des charges maximales de 5000 t, avec modélisation aux éléments finis 3D de l'interaction tunnel/pieux et suivi d'exécution des pieux en diamètre 1500 mm ;

→ Le centre d'autobus de Montrouge de la RATP sur un site de 2 hectares avec maîtrise d'œuvre d'injection de carrières, études de projets des fondations avec modélisation aux éléments finis 3D des interactions entre fondations, suivi des travaux de renforcement de sol par jet-grouting et des travaux de terrassement et soutènement ;



4

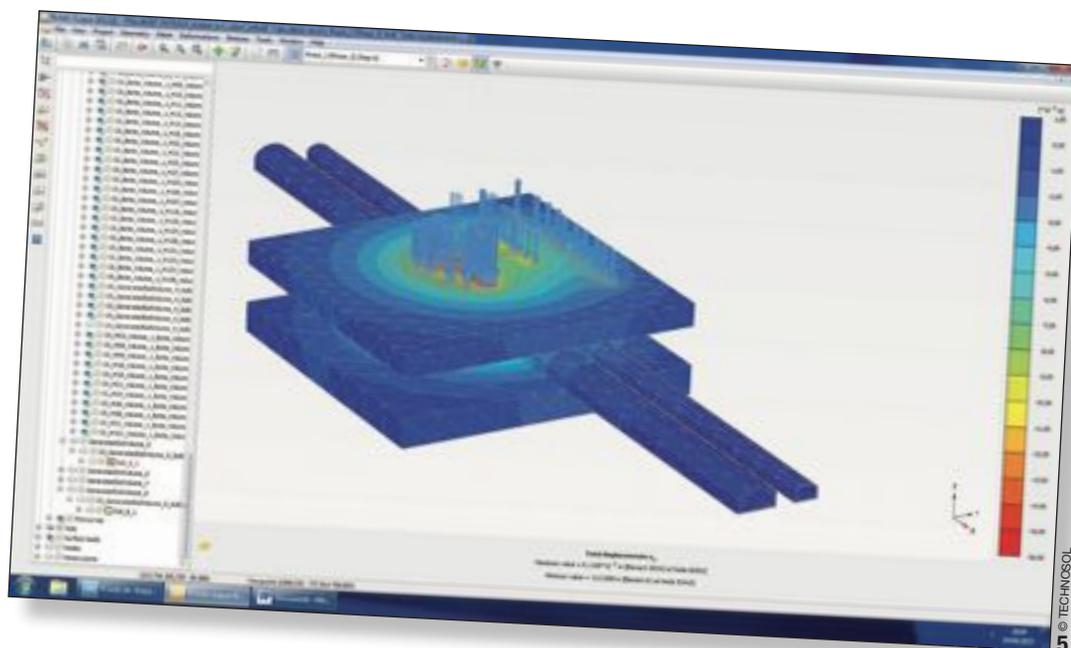
© MARC MONTAGNON

→ La construction du nouveau campus de l'École Centrale Paris, bâtiment de 2 hectares d'emprise au sol situé à Gif-sur-Yvette, pour lequel Technosol a réalisé l'ensemble des études géotechniques, depuis les reconnaissances d'avant-projet jusqu'au suivi des travaux de terrassements, soutènements et fondations ;

→ Le projet Shalapa au Mexique avec la définition et le suivi des reconnaissances complémentaires et la conception puis la supervision des travaux de digues de 13 m de hauteur sur sols compressibles.

S'agissant des projets caractérisés par des contraintes extérieurs fortes, Technosol, appuyé par Forensol, a acquis une réelle expertise en contexte sensible tant dans la prise en compte au niveau de la conception que dans la réalisation de sondages : interventions de nuit, sites industriels, zones urbaines denses et circulées, sites ferroviaires, intervention en sous-sol...

« Ceci démontre notre capacité d'organisation, notre savoir-faire de gestion de projet et notre qualité d'écoute des contraintes et des besoins des tiers et des clients », précise Michaël Reboul. Depuis 2004, sous l'impulsion de Philippe Bajart, Directeur Général Adjoint et responsable des implantations



5 © TECHNOSOL

normandes de la société, Technosol est ainsi missionnée très régulièrement pour différentes opérations sur le site Areva de la Hague, en contexte nucléaire très sensible, avec un développement ces dernières années notamment vers des missions de suivi de travaux complexes (fouilles butonnées et ancrées par tirants profonds, tunnels en méthode traditionnelle...). Depuis 2015, l'entreprise est présente auprès de la SNCF ou la RATP dans

**4- La résidence étudiante Skylight à La Défense.**

**5- Modélisation 3D des fondations de la résidence Skylight au-dessus de la ligne A du RER à La Défense.**

le cadre de projets d'aménagement de gares et de sites extrêmement contraints, avec interventions de nuit, dans le respect des prescriptions qualité-sécurité-environnement spécifiques. Technosol est ainsi notamment intervenue depuis début 2016 sur une quinzaine de sites de gares SNCF dans le cadre de projets majeurs d'aménagements ou d'interconnexion avec le réseau du Grand Paris.

## VERS LA CERTIFICATION ISO 9001

En lien avec cette dynamique de développement, Technosol a opéré une démarche de rapprochement stratégique avec le monde des entreprises de travaux. Elle est la conséquence directe de l'élargissement des compétences de l'entreprise qui lui permet de travailler directement en partenariat avec les constructeurs qui lui confient des missions dites G3 au sens de la norme des missions géotechniques, avec conseils techniques, calculs et suivis d'exécution, lui font appel pour la réalisation de sondages en chantier, et la sollicitent pour les accompagner dès le stade d'appel d'offre.

« Nous sommes désormais reconnus comme une ingénierie compétente pour accompagner certains groupements d'entreprises pour le Grand Paris Express. Ainsi, nous accompagnons le groupement Léon Grosse - Dacquin attributaire du lot T2E en réalisant pour son compte la mission G3, et nous sommes partenaire de Vinci Construction pour les sondages sur le lot T3C<sup>(\*)</sup>. Ce lot de 8,2 kilomètres s'étend de la gare souterraine de Fort d'Issy-Vanves-Clamart à la future gare Villejuif-Louis Aragon et comprend 5 nouvelles gares et 8 ouvrages annexes. D'autres partenariats devraient se conclure très prochainement ».

Cette volonté de développement, associée à un souci constant de qualité et de satisfaction de ses clients ont d'ailleurs conduit Technosol à s'engager sur la voie de la certification ISO 9001, dans le but d'une structuration des processus internes, d'une volonté d'amélioration continue, et surtout d'une démarche efficace d'écoute et d'affinement de l'orientation clients.

## DES MOYENS HUMAINS ET MATÉRIELS

Outre les moyens humains évoqués précédemment - 23 ingénieurs et 12 techniciens spécialisés - Technosol dispose de moyens informatiques et de sources documentaires adaptés avec, outre les logiciels classiques de DAO, CAO et bureautique, de nombreux logiciels spécialisés pour le dimensionnement et la stabilité des ouvrages géotechniques (logiciels de calcul analytiques et de modélisation aux éléments finis 2D et 3D) et pour la représentation des données géotechniques.

L'ensemble des moyens de forage et de reconnaissance de sol utilisés par Technosol sont ceux de Forensol, sa filiale qui regroupe l'ensemble des moyens de forage du Groupe JEI.

© TECHNOSOL



6

## PRÉSENCE SUR PARIS-SACLAY ET VERSAILLES - SATORY OUEST

**Technosol accompagne l'Établissement Public d'Aménagement de Paris-Saclay (EPAPS) pour réaliser les diagnostics initiaux de caractérisation des terrains à acquérir puis à aménager avant de les rendre à leur destination finale.**

**Paris-Saclay, projet d'ambition nationale et internationale, répond à un enjeu d'intérêt public. L'EPAPS poursuit la dynamique engagée pour finaliser le grand campus urbain actuellement en construction : accueillir les acteurs de la recherche, accompagner le développement de l'Université Paris-Saclay et créer de nouveaux quartiers de ville en s'appuyant sur les grands atouts du site, des pôles urbains existants et une zone naturelle et agricole protégée.**

**Que ce soit sur le campus urbain, ou dans les Yvelines, autour du projet de Versailles-Satory Ouest, Paris-Saclay offre l'opportunité inédite de faire la ville durable avec des services innovants, des nouvelles technologies et la possibilité d'intégrer très en amont des réflexions sur l'eau, l'énergie, la biodiversité ou encore la gestion des déchets.**

**Le site bénéficiera d'une gare de la ligne 18 du métro du Grand Paris qui le reliera directement à Versailles-Chantiers d'un côté, à Saint-Quentin-en-Yvelines, le campus urbain, Massy et Orly, de l'autre.**

**Le quartier accueillera un pôle d'innovation (centres de recherche et développement, PME, start-up) sur les mobilités du futur autour de l'implantation de l'IFSTTAR<sup>(\*)</sup> et du nouvel Institut pour la Transition Énergétique (ITE) Vedecom. Mais ce sera aussi un quartier mixte, économique et résidentiel, avec une offre diversifiée d'habitat. Parmi les implantations significatives portées par l'EPAPS, citons celle de l'École Centrale de Paris à Gif-sur-Yvette, dont Technosol a assumé l'ensemble des missions géotechniques du projet.**

(\*) IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux.

**6- Technosol a assumé l'ensemble des missions géotechniques pour le nouveau campus de l'École Centrale de Paris à Gif-sur-Yvette.**

La direction de Forensol est également assurée par Michaël Rebol, qui s'appuie sur un ancien ingénieur de Technosol en tant que responsable opérationnel, Cédric Lebeau. Ceci garantit une coordination parfaite entre les deux entités et une prise en compte des problématiques de l'ingénierie à chaque

instant de la préparation et l'exécution des chantiers de reconnaissances.

Les services logistiques, y compris les bureaux des conducteurs de travaux, sont ainsi situés sur le site du bureau d'études à Ballainvilliers, Rouen et Caen. Les deux sociétés bénéficient d'une organisation réactive et coordonnée qui permet une collaboration dans les meilleures conditions.

L'équipe compte trois conducteurs de travaux et 15 ateliers de sondage répartis entre l'Île-de-France et la Normandie, pouvant monter jusqu'à 18 équipes. Ils s'appuient sur un magasinier et un livreur sur le dépôt principal de Ballainvilliers (91) afin d'assurer la mise à disposition du matériel aux équipes sur site.

Leur expertise dans la conduite et le pilotage de missions de reconnaissances géotechniques qui lui sont confiées permet la réalisation de près de 800 chantiers par an, dans des conditions parfois fortement contraintes : sondages en intérieur, intervention en sous-sol, mobilisation de moyens de forage démontables, intervention de nuit, reconnaissances sur voiries, sur voies ferroviaires ou sur autoroutes urbaines avec fortes problématiques de trafic, usagers et réseaux, sous des infrastructures non accessibles via des sondages inclinés, prise en compte de problématiques de carrières ou zones de dissolution de gypse, couplage avec des reconnaissances pyrotechniques.

Forensol a procédé à un profond renouvellement de son parc matériel en lien avec la nouvelle norme "cage". L'âge moyen du parc de machines est aujourd'hui inférieur à 3 ans, ce qui en fait un parc très récent à l'échelle de la profession. Les investissements ont principalement été orientés vers des foreuses permettant la réalisation de sondages profonds ou des machines adaptables.

Le laboratoire, dont le responsable Jean-Louis Tacita est un expert en métrologie ayant passé l'essentiel de sa carrière à l'IFFSTAR, regroupe l'ensemble des matériels et une équipe de laborantins diplômés et expérimentés aptes à la réalisation de l'ensemble des essais mécaniques et d'identification nécessaires aux études géotechniques.

« Notre dynamique de développement s'appuie sur de nombreux investissements afin d'adapter nos moyens aux exigences de qualité et de technicité des maîtres d'ouvrage exigeants avec lesquels Technosol collabore aujourd'hui au quotidien » détaille Michaël Rebol. ▢



7



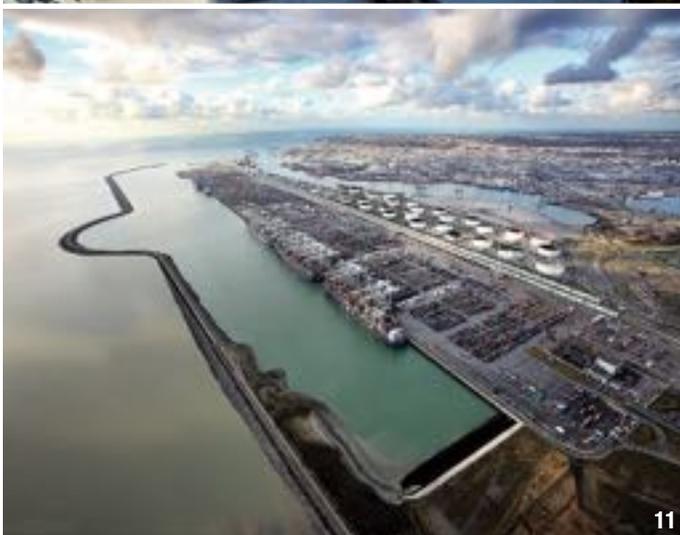
8



9



10



11

« Ainsi, l'âge moyen du parc Forensol est de 3 ans, ce qui en fait un parc très récent à l'échelle de la profession, avec des machines aujourd'hui adaptées à des forages profonds ou des sites d'intervention contraints. D'autre part, nous avons investi dans des technologies novatrices au laboratoire (notamment bâtis triaxiaux et bancs de cisaillement automatisés) ».

#### DU BÂTIMENT AU GÉNIE CIVIL

Les deux premières références marquant l'élargissement des compétences de l'entreprise des chantiers de bâtiment à ceux de génie civil et symbolisant le renouveau de Technosol sont la démolition et la reconstruction du barrage de Chatou, sur la Seine, et la LGV Sud Europe Atlantique entre Tours et Bordeaux.

**7- Le barrage de Chatou sur la Seine.**

**8- Le chantier du projet Shalapa au Mexique.**

**9- Les ateliers de la RATP Jourdan-Coren-tin-Issoire, porte d'Orléans à Paris.**

**10- Technosol accompagne le groupement Léon Grosse-Dacquin sur le lot T2E du Grand Paris Express.**

**11- Sur le quai de Bougainville, dans le port du Havre, Technosol est intervenue sur le projet de plateforme de fabrication des embases gravitaires des éoliennes offshore.**

Pour le barrage de Chatou, Technosol a réalisé pour Voies Navigables de France et Bouygues Travaux Publics une double mission d'ingénierie et de reconnaissances (2009-2013) : reconnaissances préalables sur barges, reconnaissances complémentaires en chantier, assistance à la conception des ouvrages (fouilles butonnées et ancrées par tirants de 5 m de profondeur en Seine), mise en œuvre d'un suivi des travaux par méthode observationnelle. « C'est dans le cadre de ce projet, que nous nous sommes forgé une crédibilité auprès des grandes entreprises, poursuit Michaël Reboul. Technosol était à même d'accompagner Bouygues Travaux Publics, en tant que géotechnicien, sur un projet majeur d'aménagement en région parisienne ».

Pour la LGV SEA, la mission d'ingénierie confiée par COSEA (Construction SEA Tours - Bordeaux) a consisté à réaliser les études géotechniques d'exécution des fondations de trois viaducs (Boême/Charente Nord/Charente Médiane) et 60 ouvrages d'art courants (lots 9-10-11, au nord d'Angoulême).

FIGURE 7 © MARC MONTAGNON - FIGURES 8, 9 & 10 © TECHNOSOL - FIGURE 11 © LE HAVRE PORT

La mission de reconnaissances concernait la réalisation de plus de 250 sondages (2011-2013).

Depuis, les exemples se sont multipliés des capacités de l'entreprise à participer à des projets d'infrastructures importants :

→ Pour le prolongement de la ligne 14 Nord et Sud du métro parisien entre Saint Lazare et Mairie de Saint Ouen (phase 2) et Olympiades et Orly, Technosol a réalisé les investigations in-situ et en laboratoire en appui des études de projet : sondages destructifs, pressiométriques, carottés et forages d'eau en gros diamètre atteignant jusqu'à 65 m de profondeur, avec essais de perméabilité, essais géophysiques, mesures diverses en forage (gamma-ray, micromoulinet, imagerie de paroi, dilatomètre...), et essais en laboratoire spécifiques (essais triaxiaux à chemin de contrainte imposé, essais de gonflement Huder-Amberg...).

→ Sur le quai de Bougainville, dans le port du Havre, Technosol est intervenue sur le projet de plateforme de fabrication des embases gravitaires des éoliennes offshore du Parc des Hautes Falaises de Fécamp.

→ Pour la couverture du RER A à Nanterre, pour le compte de l'Epadesa, elle a supervisé l'exécution des ouvrages géotechniques dans le cadre du projet Cœur de Quartier : clouage, paroi moulée, parois berlinoises, injections de comblement, tirants.

Dans un tout autre domaine, Technosol développe des compétences expertes dans le domaine des risques naturels : maîtrise d'œuvre de chantiers d'injection de consolidation de carrières souterraines ou de dissolution de gypse (par exemple le projet de Paris 14 cité précé-

## LE GROUPE JEI

Le Groupe JEI, fondé en 1993 (280 collaborateurs et 31 millions d'euros de chiffre d'affaires en 2016), repose sur le principe de la préservation du patrimoine construit et naturel, et est organisé en deux pôles.

**JEI ingénierie** diagnostique, dimensionne et accompagne les projets de bâtiments, génie civil, aménagement urbain, énergies renouvelables... Elle regroupe des sociétés à taille humaine expertes dans leurs domaines respectifs travaillant en synergie et pouvant ainsi proposer des solutions globales intégrées :

- **Technosol** est le bureau d'ingénierie géotechnique du groupe.
- **Iddea** est spécialisée dans les domaines du diagnostic des sites et sols pollués, de l'hydraulique et la gestion des ressources en eau, et de l'aménagement et la valorisation de sites impactés.
- **Geother** est une ingénierie experte en géothermie et solutions durables pour la construction, et en hydrogéologie.
- **IPC** réalise des diagnostics de pathologie et de réparation de structures, des missions de maîtrise d'œuvre de gros œuvre, en plus d'une activité de bureau d'études structure.
- **Setecba** conduit des missions de maîtrise d'œuvre tous corps d'état, avec spécialisation en fluides.

**JEI entreprise** réalise les travaux de réparation, confortement ou adaptation des structures. Il s'agit de la co-activité intégrée de 3 sociétés complémentaires et collaborantes, proches de leurs clients, aussi bien publics que privés, aussi bien institutionnels que promoteurs, industriels ou particuliers, qui réalisent des chantiers de bâtiment et de travaux spéciaux :

- **Chanin** porte l'activité d'entreprise générale sur des projets de réhabilitation, d'extension ou de constructions de logements ou de bureaux.
- **Chanin btp** accompagne quant à elle ses clients pour trouver et mettre en œuvre des solutions de comblement et de confortement de terrain (injections, tirants, miniberlinoises), de reprises en sous-œuvre et de fondations spéciales (micropieux).
- **Spirale** répare, renforce et transforme les structures béton des ouvrages d'art, des tunnels, des parkings, des entrepôts et des bâtiments et met en œuvre sur ces structures des solutions d'étanchéité variées et adaptées à la typologie du support et à l'objectif attendu.

demment, avec la maîtrise d'œuvre d'un chantier d'injections de plus de 3 millions d'euros), ou missions de diagnostics d'aléas (par exemple diagnostic et définition des travaux de confortement de l'ensemble des carrières, murs de soutènement et fronts rocheux de la ville de Conflans-Sainte-Honorine).

### LE FERROVIAIRE AUSSI

Le domaine ferroviaire fait désormais partie intégrante de son champ d'ac-

tivité. Outre la LGV SEA, les lignes 11 et 14 du métro de Paris et le Grand Paris Express, Technosol a assuré entre 2014 et 2016 l'ingénierie pour la construction d'une passerelle et d'un pont entre la ZAC Batignolles et le secteur Saussure à Paris 17<sup>e</sup> (dimensionnement des fondations sur groupe de micropieux et supervision géotechnique d'exécution des travaux).

D'autre part comme cité précédemment, les interventions régulières auprès de la RATP et le SNCF renforcent cette expertise dans ce domaine, avec la réalisation d'études techniques pour des aménagements de gare avec des enjeux forts et fortement contraints techniquement. Citons ainsi les aménagements de la gare d'Issy-les-Moulineaux en interaction avec le Grand Paris Express, située sur un coteau, avec nombreux ouvrages de soutènement le long des voies dont Technosol a assuré le dimensionnement en avant-projet ; ou les études de conception pour la réalisation d'un nouveau passage inférieur à la gare de Vitry-sur-Seine, terrassé en opération coup de point sur un week-end au sein d'alluvions très perméables sous nappe.

### « L'EXPERTISE TECHNIQUE ET L'ESPRIT D'ÉQUIPE »

Ce développement récent de l'entreprise démontre que lorsqu'une équipe jeune et motivée est portée par une ambition forte, dévoile une expertise technique assumée et est animée d'une cohésion exemplaire, la réalisation d'un projet de développement ambitieux devient possible.

Le développement de l'expertise technique, les collaborations récurrentes avec les grands donneurs d'ordre publics, ainsi que le rapprochement avec les constructeurs, sans oublier les prestations historiques dans le domaine du bâtiment, permettent aujourd'hui à Technosol de se positionner en tant qu'acteur majeur de la géotechnique francilienne et normande.

Mais Michaël Reboul sait que rien n'est acquis et Technosol doit continuer à se réinventer afin de conquérir de nouveaux marchés, et le fera dans l'esprit des valeurs de la société que nous rappelle son directeur : « *l'expertise technique et l'esprit d'équipe au service de l'ambition de développement* ». □

12- L'une des machines de Forensol sur le chantier Skylight à La Défense.

13- Acheminement d'une machine Forensol sur un chantier de nuit pour la SNCF.



1- Le macro lot T3C de la future ligne 15 de métro a été attribué par la Société du Grand Paris au groupement de VINCI Construction (VINCI Construction Grands Projets, Dodin Camperon Bernard, VINCI Construction France, Botte Fondations) avec Spie Batignolles TPCI et Spie Fondations.



© JD LAMY/BAUDIN CHÂTEAUNEUF

# LE PONT À TRANSBORDEUR DE ROCHEFORT RENDU À SA VERSION D'ORIGINE

REPORTAGE DE MONIQUE TRANCART

**OUVERT EN 1900 ET TRANSFORMÉ AVEC LE TEMPS, L'OUVRAGE MÉTALLIQUE RETROUVE SA CONCEPTION INITIALE EN PLUS RÉSISTANTE. SA NACELLE REPRENDRA DU SERVICE EN 2019. EN ATTENDANT, LE PUBLIC EST CONVIÉ À ASSISTER À CETTE RESTAURATION.**

Le pont à transbordeur de Rochefort (Charente-Maritime) est si fin que, de loin, il semble dessiné sur le paysage. Quand il a été construit, fin XIX<sup>e</sup> siècle, il n'avait pas besoin d'avoir de larges profilés métalliques pour faire passer 10 t d'une rive à l'autre de la Charente. Son tablier de 350 t est perché à 50 m au-dessus des plus hautes eaux afin que les mâts des bateaux à voile ne s'y accrochent pas. Ses pylônes - 135 t par rive - culminent à 66 m.

Seul ouvrage de ce type encore debout en France, le pont du Martrou - son autre nom - est aussi une remontée mécanique, à cause de sa nacelle mobile. Ce vestige dont Ferdinand Arnodin est l'ingénieur-constructeur, est entré dans une phase de grands travaux, la 3<sup>e</sup> de sa vie<sup>(1)</sup>, en septembre 2016, pour trois ans.

En 2010, la rupture d'un brin de câble suite à la tempête Xynthia, pousse les collectivités locales à alerter la Direction régionale des affaires culturelles (Drac),

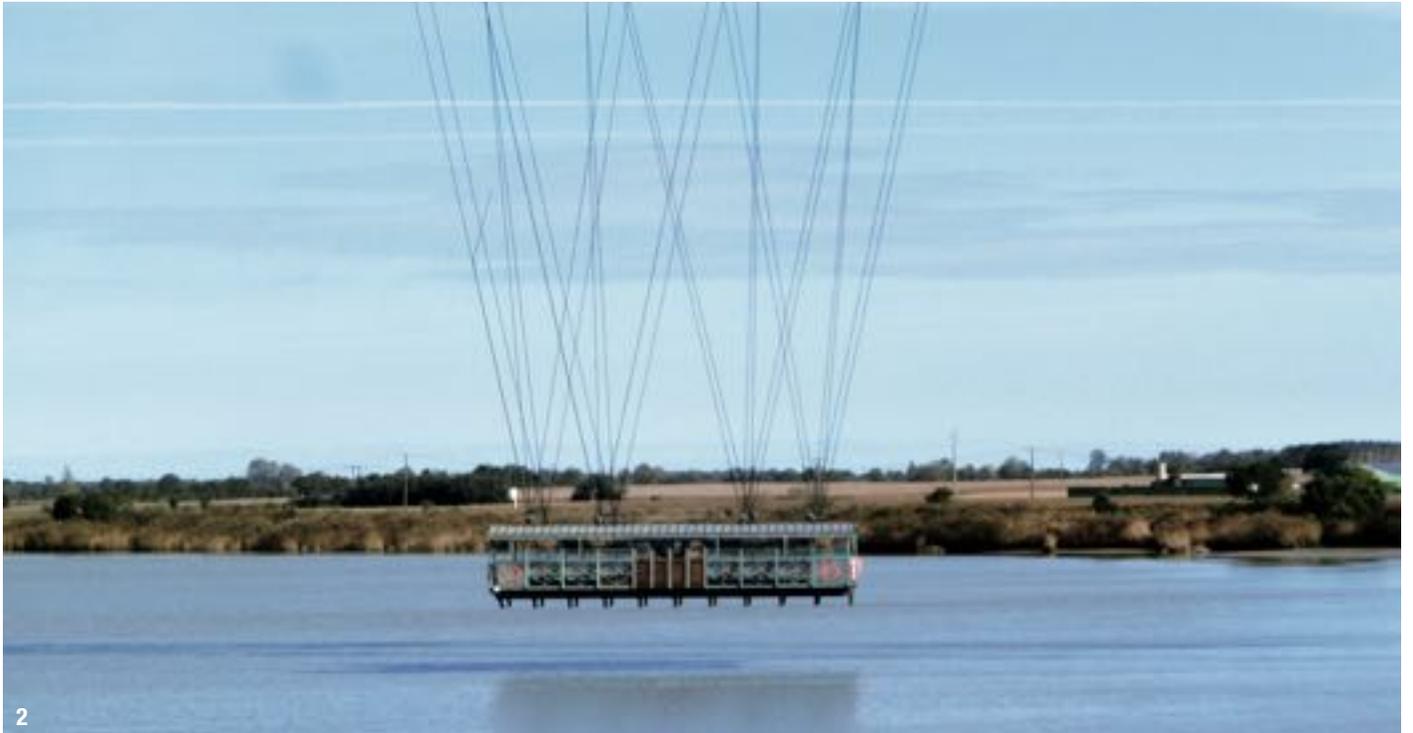
**1 - Le pont à nacelle de Rochefort (Charente-Maritime) est le dernier du genre en France. Ennemi n°1 : le vent.**

représentante de l'État, propriétaire de l'ouvrage.

L'ampleur de la remise en état est évaluée alors à plus de 21 millions d'euros,

montant qui n'entre pas dans le budget de la Drac. Suite à une nouvelle rupture en 2014, l'État confie la maîtrise d'ouvrage de la restauration à l'Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (Oppic, ministère de la Culture), d'envergure nationale. La Drac avait commandé une étude à l'architecte en chef des monuments historiques, Philippe Villeneuve, le pont étant classé depuis 1976.

La décision de le restaurer en retournant à sa conception initiale est approu-



2

© JD LAMY/BAUDIN CHÂTEAUNEUF

vée par la Commission nationale des monuments historiques et réaffirmée par l'Oppic après nouvelle expertise. « Ferdinand Armodin était un inventeur spécialiste des ponts transbordeurs en traversée de rivière en France et ailleurs, rappelle M. Villeneuve. Presque tous les grands ports en étaient dotés - Nantes, Brest, Marseille, Bordeaux - et tous ont été détruits sauf celui Rochefort mais il a été très modifié en 1933 pour le passage de véhicules. Les poutres du tablier à treillis d'Armodin avaient alors été remplacées par des poutres pleines. Quand un viaduc routier ouvre en 1991 dans le secteur, le transbordeur conserve les piétons et les vélos. Le fait qu'il n'y aurait plus de véhicules a permis de revenir à la poutre de type Armodin sans le regretter

**2- La nacelle traversait la Charente à 2 m au-dessus des hautes eaux.**

**3- La corrosion a fait son œuvre. Sur la photo : le 1<sup>er</sup> chevalet est oxydé, le 2<sup>e</sup> est corrodé comme les parties de pylône en arrière-plan.**

**4- 1<sup>re</sup> dépose du chantier : la nacelle. Elle est restaurée sur la berge à la vue du public.**

et tout en respectant les normes de sécurité actuelles. Le pont d'Armodin est ressuscité pour son intérêt patrimonial. »

#### AU CROISEMENT DE L'HISTOIRE ET DE L'INGÉNIERIE

Restait à pallier la fermeture du pont pendant trois ans alors qu'il attire 150 000 visiteurs par an. L'Oppic propose que le chantier soit visitable ou visible par le public, ce que la communauté d'agglomération de Rochefort approuve. Il inclut ce volet dans l'appel d'offres en dialogue compétitif, lancé en 2015. Parallèlement, un bateau-passeur (bac) est remis en service à quelques mètres à partir des anciennes rampes d'accès du pont levant (1966-1991).

Cette restauration est exceptionnelle pour ceux qui sont chargés de la mener à bon port. « Je suis plus habitué à m'occuper de châteaux ou de cathédrales, reconnaît Philippe Villeneuve, maître d'œuvre. Le pont du Martrou est une œuvre d'ingénieur, avec un vocabulaire spécifique que Christophe Accart du bureau d'études Artcad sait rendre abordable. Ce chantier est au croisement de plusieurs visions, la mienne sur la valeur historique et celle des ingénieurs pour le consolider et lui rendre sa stabilité. »

C'est le seul ouvrage d'art dont est chargé l'Oppic.

« C'est une opération singulière pour nous, convient Antoine-Marie Préaut, chef du département opérationnel. Nous explorons un nouveau champ. ▹



3

© CHRISTOPHE ACCART/ARTCAD



4

© JD LAMY/BAUDIN CHÂTEAUNEUF

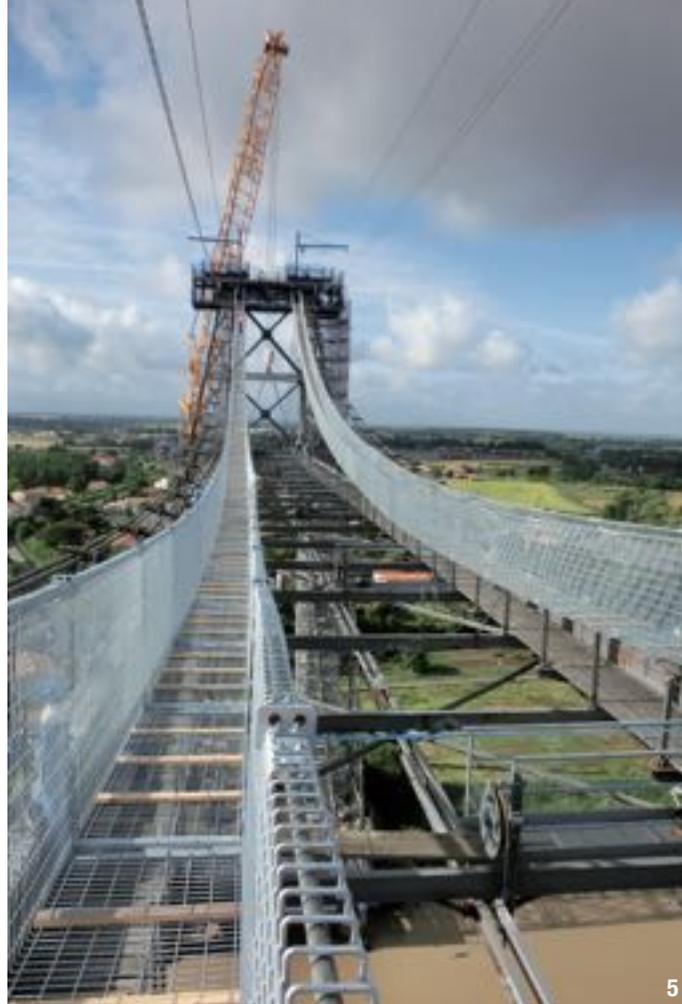
Nous avons mis les acteurs en relation pour identifier le meilleur scénario. L'absence de bureau de contrôle comme dans le bâtiment, conduit à nous en remettre davantage à l'entreprise. C'est aussi un bon exemple de communication avec le public. La restauration est attractive. »

Le pont à transbordeur de Rochefort ne présente pas de difficulté pour Artcad, spécialisé en ouvrages d'art courants ou exceptionnels. « *Le volet inhabituel pour nous est la médiation avec le public*, indique Christophe Accart, gérant et chef de projet. *Cela apporte une contrainte supplémentaire sur le déroulement des travaux.* »

### RIVETAGE SUR SITE

Les promeneurs sur le chemin de la Charente peuvent apercevoir la nacelle à terre, premier composant enlevé en septembre 2016. Grâce à une fenêtre dans la palissade de chantier, ils assisteront à sa réfection.

« *Toutes les palissades sont en bois et ont été faites sur mesure*, explique Christian Croizier, responsable d'exploitation du département rénovation ouvrages d'art chez Baudin Châteauneuf, entreprise chargée de la réalisation. *Nous avons reconstitué les 175 m de l'ancien tablier à terre dans une zone spécifique, fin juin - début juillet. Le public a pu le voir à partir d'un belvédère surplombant le chantier à 5 m de haut. Puis nous avons découpé le tablier en colis au même endroit afin de l'évacuer en centre d'enfouissement. Sa peinture, comme celle des pylônes, était renforcée par de l'amiante. Le coût de son désamiantage et de sa remise en état équivalait à celui d'un neuf, d'où le choix de le changer.* »



© CHRISTOPHE ACCART/ARTCAD

Sur cette zone, aura lieu un peu d'assemblage du tablier neuf, en particulier le rivetage. « *Montrer le chantier au public nous conduit à effectuer certaines tâches sur place là où d'habitude nous les exécutons en atelier*, ajoute M. Croizier. *Les moyens de manutention ne sont pas les mêmes.* » Par ailleurs, l'Oppic a demandé à l'entreprise de prévoir des événements auxquels le public est convié, comme la dépose du dernier tronçon du tablier, cet été. Si c'est le week-end, le personnel, en grand déplacement, doit rester sur place.

Plusieurs dispositifs sont installés pour permettre le travail des ouvriers sur le tablier et les pylônes. Citons la plate-forme de travail sous le tablier qui a

**5- Les ouvriers accèdent aux éléments du pont par deux passerelles sur câbles.**

**6- Enchevêtrement du tablier, d'un pylône, des échafaudages et de la plate-forme de travail supérieure.**

**7- Câbles provisoires retenus par une poutre (bleue, au 1<sup>er</sup> plan) placée à l'arrière du massif d'ancrage.**

permis à des équipes, protégées vis-à-vis du risque amiante, de pré-découper des membrures.

Le travail au-dessus du tablier - fin de la découpe, dépose, remontage des nouveaux tronçons, accès aux attaches de suspente, etc. - se fait à partir de 2 passerelles à câbles, sorte de pont de singe, conçues par Baudin Châteauneuf. Il s'agit d'une succession de cages métalliques (sans plafond) de 2 m de long enfilées telles des perles sur des câbles de 20 mm.

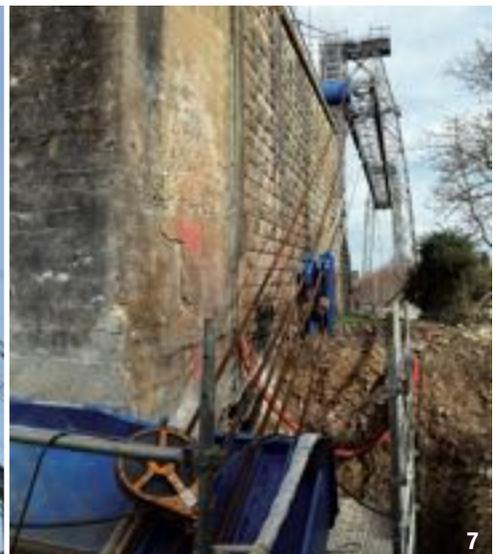
Pour les monter, un ouvrier, à partir d'une plate-forme sur chaque pylône, accroche un panier au précédent et le laisse glisser vers le milieu du pont. Les passerelles, parallèles et à l'intérieur du tablier, sont entretoisées et reliées aux côtés du pont, ceci afin qu'elles ne bougent pas trop, notamment sous le vent, plus fort en hauteur qu'au sol. « *Le vent est le pire aléa sur ce chantier*, assure Pauline Prion, chef de projets à l'Oppic. *L'ouvrage actuel résiste à 90 km/h, au-delà, il pourrait y avoir déformation irrémédiable.* »

### JUSTIFIÉ À 115 KM/H

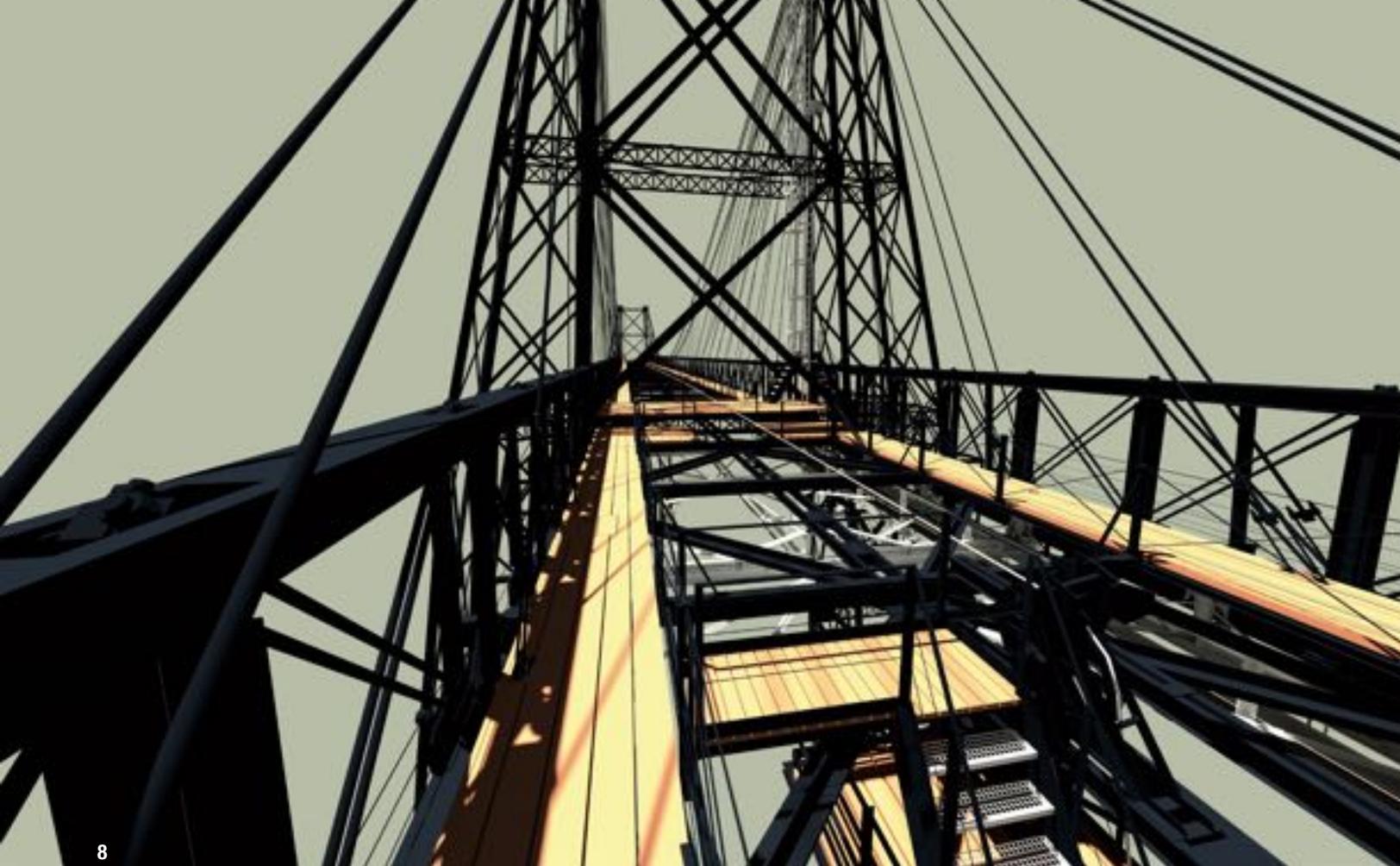
Artcad a été chargé des calculs pour rendre maximale la sécurité de l'ouvrage, sur les composants neufs - tablier, câbles - et sur ceux qui sont rénovés comme les pylônes : « *Le vent dans les pylônes à prendre en compte in fine est le problème n°1 mais aussi pendant le chantier, et à un niveau encore plus contraignant*, souligne Christophe Accart. *Les bâches qui les confinent au moment du décapage et de la peinture, accroissent la prise au vent.* » Les zones recouvertes ont été délimitées à partir de leur surface de prise au vent acceptable, c'est-à-dire



© JD LAMY/BAUDIN CHÂTEAUNEUF



© BAUDIN CHÂTEAUNEUF



8

© ARTCAD

qui ne menaçait pas la stabilité de l'ouvrage.

« Après restauration, chaque pylône aura été renforcé au maximum de ce qu'on peut faire sans le remplacer entièrement, poursuit M. Accart. La capacité de l'ouvrage vis-à-vis de la pression du vent sera augmentée des 2/3 environ, ce qui correspond à une justification en termes de vitesse de vent qui passe de 90 km/h environ, à 115 km/h. Au-delà il aurait fallu remplacer les pylônes, ce qui n'était pas envisageable car c'est un monument historique. »

Les événements météorologiques passés ont laissé des traces jusque dans les fondations. « En phase diagnostic, nous avons eu un soupçon de mouvement lié au vent dans le puits en maçonnerie d'un pylône, relate M. Accart. Ces fondations de 3 m de diamètre descendent jusqu'à la roche calcaire à 18 m sur la rive de Rochefort et à 9 m, côté Échillais. Un des fûts n'était plus vertical. Par grand vent, l'effort se porte sur le pied des pylônes, ce qui a tendance à les décoller. Pendant le chantier, les échafaudages de 320 t par rive contribuent à leur stabilité alors que l'enlèvement du tablier de 350 t va en sens inverse. » Les missions géotechniques ont montré qu'il était admissible de laisser le fût oblique tel quel. Par ailleurs, la dépose des câbles pour les changer aura pour effet de rendre tout leur poids à leurs massifs d'ancrage -1 800 t + 260 ajoutées en 1933. Ils auraient donc tendance, si rien n'était fait à ce moment-là, à s'en-

**8- Retour au tablier d'Arnodin discrètement modernisé tout en augmentant sa résistance.**

## UNE ASSOCIATION INTERNATIONALE VEUT INSCRIRE LES PONTS TRANSBORDEURS AU PATRIMOINE DE L'UNESCO

### 10 RENDEZ-VOUS AVEC LE PUBLIC

**Le public est convié à dix événements\* sur le chantier du pont à transbordeur (2016-2019) :**

- Mise en service des 2 ascenseurs de chantier,
- Passerelles à câbles,
- Dépose du premier élément de tablier par grue,
- Dépose d'un des derniers éléments par barge,
- Visite des chambres d'ancrage des câbles avec découverte des ancrages initiaux,
- 1<sup>er</sup> pylône terminé (avec peinture et escaliers),
- 1<sup>er</sup> élément de tablier neuf remonté,
- Dernier élément de tablier neuf raccordé,
- Remontage du chariot et de la nacelle,
- Inauguration et mise en lumière.

\* Ces événements sont susceptibles d'être modifiés.

fonder dans le sol de 30 cm ou de 2 m, selon la méthode de calcul employée. L'enlèvement des 260 t de 1933 réduit le phénomène sans l'éliminer. Le Cerema<sup>(2)</sup> était d'avis d'ajouter des micropieux à ceux de leurs fondations. Baudin Châteauneuf a préféré contrer cet "enfouissement" par des câbles provisoires sur massifs et pylônes.

#### REPRENDRE TOUS LES CALCULS DU TABLIER

Les câbles provisoires prennent le relais des existants. Par exemple, ils compensent l'effet de l'enlèvement du tablier sur la tête de pylône. Parmi les 24 câbles, 8 vont de pylône à pylône, la moitié de sommet à sommet, la moitié au niveau du tablier. Sur chaque rive, 8 autres câbles sont ancrés sur une

poutre à l'arrière du massif d'ancrage, dont 4 rejoignent le sommet de chaque pylône et 4, le tablier.

Le pont à transbordeur du Martrou était haubané de chaque côté des pylônes, et à suspentes au centre. Le changement de tous les câbles suppose de rééquilibrer l'ensemble des tensions en fin de chantier. « Nous aurons sûrement plusieurs phases d'équilibrage, prévoit M. Crozier. En amont, nous estimerons et définirons le phasage logique et nous nous adapterons sur le chantier. Il y aura sûrement des aller retour avec notre bureau d'études. »

En ce qui concerne le retour au tablier à poutres d'Arnodin d'origine, il a donné lieu à des calculs plus précis que ceux de la fin du XIX<sup>e</sup>. « Cette poutre est considérée comme semi-rigide car ses diagonales sont en treillis articulé au lieu d'être encastrées dans les membrures supérieure et inférieure, explique M. Accart. Même avec un acier plus fort, ça ne marchait pas. Ce n'est pas étonnant que ça ait cassé par le passé. Nous avons repris les calculs en augmentant la hauteur de la membrure supérieure, l'inférieure portant le chariot de la nacelle. Sous les directives de Philippe Villeneuve, nous avons trouvé que nous pouvions ajouter 58 mm et conserver leur entraxe de 2 m pour atteindre la résistance voulue tout en restant dans l'esprit de la poutre d'Arnodin. De plus, le treillis a été amélioré pour éviter les pièges à eau, source de corrosion. » Un tel ajout de hauteur sur la membrure d'une poutre de 3 m passe inaperçue. ▶



© JD LAMY/BAUDIN CHÂTEAUNEUF

9

## ÉVACUATION DU TABLIER PAR LE FLEUVE

Le tablier du pont à transbordeur de Rochefort (Charente-Maritime) a été déposé cet été. Pour cela, il a été découpé en 22 tronçons dont 14 ont été descendus un par un sur une barge placée sur la Charente juste en dessous. Celle-ci accostait avec son chargement sur la rive d'Échillais. À terre, un portique le prenait en charge et le posait sur un camion qui l'acheminait jusqu'à une aire spécifique (cf. article ci-contre).

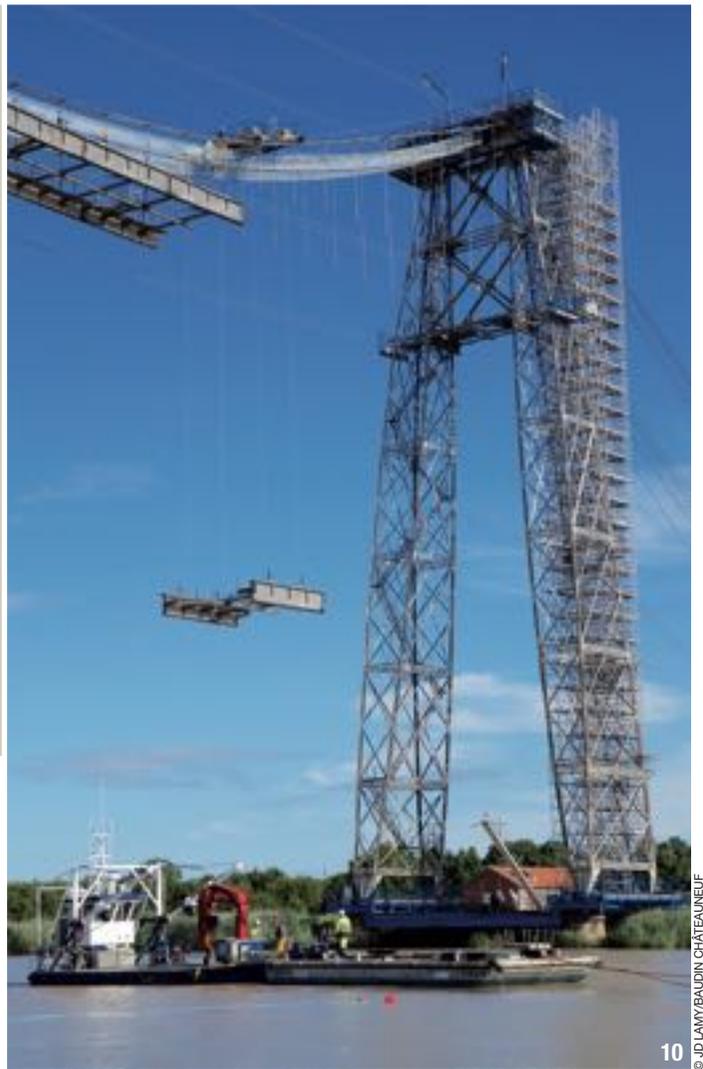
À 60 m de haut, un chariot, équipé de 4 treuils, se positionnait au-dessus de chaque tronçon grâce aux tire-forts hydrauliques situés en tête des pylônes. Il roulait sur des câbles de traille (cf. photo) puis sur les câbles porteurs du pont au fur et à mesure qu'il progressait vers le centre du tablier.

### SIX HEURES PAR ÉLÉMENT

Une fois l'élément pris en charge par les 4 treuils, sa découpe était achevée. Il était ainsi désolidarisé du reste du tablier. Les suspentes qui le retenaient étaient alors coupées. Les 4 treuils pouvaient descendre le tronçon jusqu'à la Charente.

La barge en attente était maintenue en position par deux bateaux, un pousseur et un tireur, qui luttent contre le courant, afin de réceptionner le colis suspendu aux câbles des treuils.

L'opération complète de dépose a pris six heures par élément environ. Les huit autres morceaux, situés à l'extérieur des pylônes, ont été enlevés par grue.



© JD LAMY/BAUDIN CHÂTEAUNEUF

10

« De plus, l'âme des profilés en U est renforcée, » ajoute M. Croizier.

### GRAISSAGE AUTOMATIQUE

Afin d'allonger la durée de vie des parties métalliques en limitant la corrosion, l'entreprise a proposé de galvaniser les pièces rondes et filetées - étriers, suspentes, tirants d'ancrage, etc.

La peinture sera noire comme celle d'origine. Elle devra être conforme à la certification ACQPA, classe 4, pour résister à l'agressivité de l'environnement marin. De plus, Artcad a demandé que l'avant-dernière couche soit doublée. Les pièces en contact avec le fleuve ou difficiles d'accès - ancrage et contrepoids des culées - seront peintes sous certification eaux saumâtres et maritimes (IM2). Les câbles reçoivent une peinture bitumineuse.

Enfin, le graissage des galets du chariot de la nacelle devient automatique. Auparavant, le personnel de l'agglomération y passait trois demi-journées par semaine, avec les risques que cela comportait. □

**9-** Le chariot avec 4 treuils roule sur des câbles de traille (au-dessus du casque du chef de chantier) puis sur les câbles porteurs du pont. Les suspentes sont coupées au dernier moment.

**10-** Le morceau de tablier descend au-dessus d'une barge maintenue en place par deux bateaux.

1- Autres phases de travaux importants : 1933 et 1990-1994.  
2- Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (Oppic), ministère de la Culture et de la Communication.

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :** agence Philippe Villeneuve, architecte en chef des monuments historiques, assisté du bureau d'études techniques Artcad.

**ENTREPRISE :** Baudin Châteauneuf.

**EXPLOITANT DU PONT :** Communauté d'agglomération Rochefort Océan.

**BUDGET PRÉVISIONNEL :** 22,5 millions d'euros à la charge de la Direction générale des patrimoines (État).



# PONT TRANSBORDEUR DE ROCHEFORT UN SITE TRÈS FRÉQUENTÉ

Les récits sont nombreux de la traversée de la Charente à pied sur le pont à transbordeur de Rochefort (Charente-Maritime), à 50 m de haut et parfois de nuit. Raccourci pour rejoindre l'arsenal militaire par le sud depuis Échillais, il n'avait pas été conçu pour ça en 1900. Les piétons embarquaient sur une nacelle - le transbordeur -, suspendue par des câbles à un chariot qui la glissait d'une rive à l'autre, à 2 m au-dessus des hautes eaux du fleuve. Avantage sur l'ancien bac : une traversée en quelques minutes, quelle que soit la marée<sup>(1)</sup> et à condition de céder le passage aux navires qui rejoignaient Rochefort ou la mer.

Les habitants sont très attachés à l'ouvrage métallique appelé aussi pont du Martrou. Il a failli être démoli en 1967 vu son état et la construction d'un pont levant. Il lui a survécu et est classé monument historique depuis 1976. Le pont levant disparaît en 1991 à la mise en service du viaduc routier à quelques dizaines de mètres<sup>(2)</sup>.

Le pont transbordeur a rendu bien des services et s'est adapté au fil du temps. À la fin des années 1920, des véhicules de plus en plus lourds l'empruntent. Les poutres à treillis du tablier se fissurent et se rompent. En 1933, ces poutres sont remplacées par des poutres pleines. Du béton est ajouté à l'arrière des massifs d'ancrage des câbles du pont suspendu

et des câbles sont remplacés. La nacelle est transformée pour supporter 26 t au lieu de 10. Elle transborde 200 000 véhicules par an dont des camions vers des carrières et des exploitations forestières.

## CHANTIER SUIVI DE PRÈS PAR LES HABITANTS

Mis à rude épreuve, le pont à transbordeur fait l'objet de gros travaux au début des années 1990 et reprend le passage de piétons et de vélos, de mars à novembre. Il est classé "remontée mécanique" et son exploitation est confiée à l'agglomération de Rochefort, l'État restant propriétaire. « Nous avons adhéré au projet de restauration initié par l'État en 2010 suite aux dégâts de la tempête Xynthia car nous voulions garder la dynamique de 1994 à 2015 où la fréquentation du site avait triplé, confie Stéphanie Charpentier, coordinatrice du site du pont à transbordeur à la Communauté d'agglomération de Rochefort Océan<sup>(3)</sup>. Avant sa restauration actuelle, 150 000 personnes venaient le voir dont 60 000 empruntaient la nacelle. Le chantier est très suivi par les habitants. » La presse locale est invitée régulièrement et répercute l'avancement des travaux.

## RANIMER LA CÂBLEUSE D'ARNODIN

En 2019, quand le pont aura retrouvé son aspect et sa navette d'origine, le



13 © 2005/21/6-3F196 ARCHIVES MUNICIPALES DE ROCHEFORT

11- Le pont était traversé à pied, parfois de nuit, pour rallier l'Arsenal de Rochefort.

12- La navette va retrouver son élégance d'origine.

13- Les chargements étaient de plus en plus lourds : au centre, une charrette pleine de bois.

un pendant à la Corderie royale de Rochefort qui était capable de fabriquer des cordes à navire de guerre à voiles, de 195 m d'un seul tenant, au XVII<sup>e</sup> siècle.

## MISE EN VALEUR DES BERGES DE LA CHARENTE

Sans oublier la fréquentation régulière à pied ou en vélo par les habitants, conditionnée à la fiabilité de l'ouvrage une fois restauré. Cela éviterait d'ajouter une voie cyclable en encorbellement sur le viaduc. Le pont à transbordeur s'intègre dans la politique de la Caro de valoriser les berges de la Charente, que ce soit par la Zone touristique d'intérêt communautaire depuis 2002, ou par le label Grand site de l'estuaire et de l'arsenal, obtenu en 2013. Notons également qu'il s'agit d'un site Natura 2000 avec des réserves naturelles.

site reprendra sa vocation touristique que Ferdinand Arnodin, son concepteur, avait pressentie. L'agglomération a rejoint l'Association mondiale des ponts transbordeurs en service<sup>(4)</sup>, celui-ci étant le dernier en France. « Nous aimerions que ces ouvrages soient inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco, précise M<sup>me</sup> Charpentier. Nous prévoyons des aménagements pour recevoir 250 000 visiteurs vers 2020 et pourquoi pas un belvédère sur un des pylônes pour contempler le lever ou le coucher du soleil. » Peut-être plus certain est le projet d'implanter la câbleuse d'Arnodin sur la rive,

1- Le pont est à une vingtaine de kilomètres de l'estuaire. La marée se fait sentir jusqu'à 80 km.

2- Photos des 3 ouvrages sur : [www.bibibourcefrc.fr/wa\\_122.html](http://www.bibibourcefrc.fr/wa_122.html).

3- 25 communes, 63 000 habitants.

4- Autres ponts transbordeurs : Vizcaya (Espagne, 1906), Newport (Pays de Galles, 1906), Osten-Hermoor (Allemagne, 1909), Middlesbrough (Angleterre, 1911), Rendsburg (Allemagne, 1913), Buenos Aires (Argentine, 1914), Warrington (Angleterre, 1916).  
Source : Maison du transbordeur de Rochefort.





© ANNE-CLAUDE BARBIER

# LE TÉLÉPHÉRIQUE DE BREST, L'AVENIR DE LA MOBILITÉ URBAINE

AUTEURS : SÉBASTIEN PIENNE, INGÉNIEUR ÉTUDES SÉCURITÉ, SETEC TPI - FABIEN PEYRARD, INGÉNIEUR PROJET ET COORDINATION, BMA/SEM TRAM - MICHEL VILLETTE, ARCHITECTE, HALET-VILLETTE - NICOLAS CHAPUIS, DIRECTEUR GÉNÉRAL FRANCE, BMF - CHRISTOPHE TAMBOURIN, INGÉNIEUR CONSEIL, DCSA

**PAR DÉLIBÉRATION DU 9 DÉCEMBRE 2011, BREST MÉTROPOLE A APPROUVÉ À L'UNANIMITÉ LE PROJET DE RÉALISATION D'UNE LIAISON AÉRIENNE PAR CÂBLE ENTRE LE BAS DE SIAM (CENTRE-VILLE) ET LES ATELIERS DES CAPUCINS. MOINS DE CINQ ANS PLUS TARD, LE 19 NOVEMBRE 2016, LE PREMIER TÉLÉPHÉRIQUE URBAIN DE FRANCE EST MIS EN SERVICE À BREST. LE CHALLENGE A ÉTÉ RELEVÉ PAR LA MOBILISATION ET LE SAVOIR-FAIRE DES ÉQUIPES DE LA MAÎTRISE D'OUVRAGE SEMTRAM ET DU GROUPEMENT DE CONCEPTION-RÉALISATION CONDUIT PAR BOUYGUES TP RF.**

## LE PROJET

### L'ORIGINE

La réussite d'un grand projet urbain passe nécessairement par l'accessibilité au site. Si le tramway dessert le haut du plateau des Capucins, les Ateliers sont, eux, situés sur un promontoire rocheux en impasse, très proche à vol d'oiseau du centre-ville (400 m environ) mais difficilement accessible. D'où l'idée d'emprunter la voie des airs pour créer

ce maillon manquant à la chaîne de déplacement de l'agglomération brestoïse. Dès 2010-2011, les études préliminaires avaient montré la pertinence du projet de transport par câble pour franchir la rivière Penfeld (figure 2) :  
→ Pertinence fonctionnelle : débit suffisant, emprises réduites au sol, respect des contraintes militaires en termes de tirant d'air pour le passage des navires ;

→ Pertinence technique : un savoir-faire reconnu en France et en Europe sur la conception et la réalisation des téléphériques ;  
→ Pertinence économique : un coût global (y compris études et frais de MOA) inférieur à 20 M€ HT, contre 25 à 60 M€ HT pour les autres solutions envisagées (pont transbordeur, pont routier levant, passerelle piétonne levante) ;

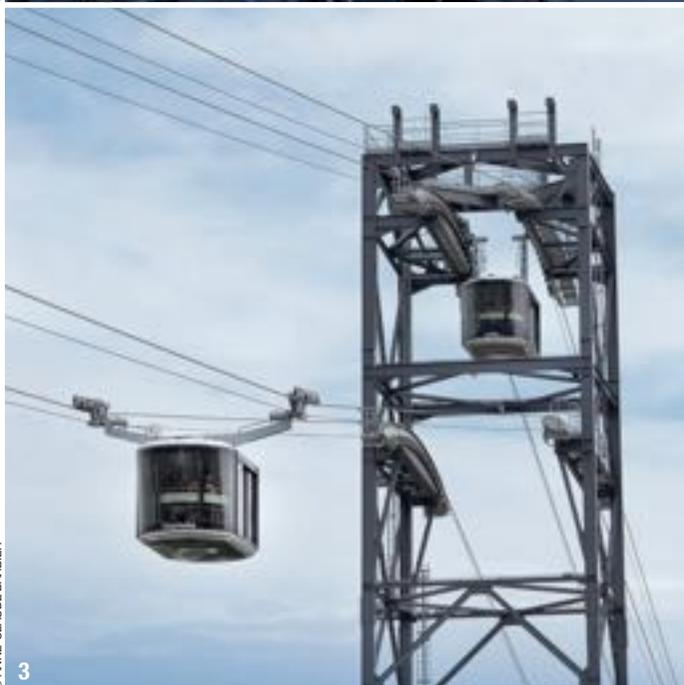
→ Pertinence en termes de déplacements et de transport : favorise l'intermodalité et les modes doux de déplacement dans le centre de l'agglomération via l'intégration au réseau « Bibus » comprenant déjà Tramway et Bus.

### OBJECTIFS ET CONTRAINTES

Le projet devait remplir un certain nombre de fonctions tout en respectant



2



3

**1- Vue du téléphérique de Brest depuis le pont de Recouvrance.**

**2- Vue du téléphérique de Brest depuis le pont de l'Harteloire.**

**3- Saut-de-mouton à câble.**

**1- View of the Brest cable car from the Recouvrance bridge.**

**2- View of the Brest cable car from the Harteloire bridge.**

**3- Cable flyover.**

des contraintes externes. Les objectifs étaient de fournir aux passagers quels qu'ils soient un service facile, rapide, confortable et accessible. Pour ce faire, l'organisation des stations, la fréquence du téléphérique, l'aménagement des cabines et la montée/descente des voyageurs sont autant de points qui ont été étudiés avec attention afin de respecter la feuille de route fixée par les élus. Les chiffres parlent d'eux-mêmes :

- 3 minutes de temps de trajet ;
- 6 minutes de fréquence en journée (pouvant descendre à 3 minutes en mode « événement ») ;
- 650 pphpd<sup>(1)</sup> en débit nominal, jusqu'à 1 200 pphpd en mode « événement » ;
- 15 m<sup>2</sup> de surface de cabine, soit la taille d'un demi-bus ;
- 60 personnes par cabine au maximum ;

- 108 km/h : stabilité garantie jusqu'à cette vitesse de vent ;
- 675 000 passagers attendus par an. Au vu du site franchi - une emprise militaire, la Base Navale de Brest - les premières contraintes étaient les conditions de survol de ces terrains : respect d'un tirant d'air pour les navires (une cinquantaine de mètres), maintien des circulations pendant les travaux, survol de bâtiments militaires.

Tout cela s'inscrivant dans un contexte réglementaire plutôt adapté à la montagne et non au milieu urbain. Des groupes d'échanges portés par le Gart<sup>(2)</sup> avec les services de l'État - au premier rang desquels le Strmtg<sup>(3)</sup> - ont permis de mieux prendre en considération certaines particularités des téléphériques urbains : visibilité du parcours, moyens de communications avec les cabines, survol de parcelles bâties. Les stations également devaient s'intégrer au mieux dans le tissu urbain et architectural : moyen de transport en commun venant compléter le réseau existant (tramway, autobus), arrivée à l'intérieur des Ateliers des Capucins et départ au niveau du trottoir, en surplomb de la Base Navale côté rive gauche.

### VERS LA RÉALISATION

Afin de garantir la maîtrise de l'objet à concevoir et à construire, le recours à un marché de Conception-Réalisation s'est imposé comme une évidence. La maîtrise du savoir-faire réside d'abord chez les constructeurs de remontées mécaniques et les interfaces nombreuses et complexes de l'insertion dans un site urbain rendaient ce montage pertinent afin d'associer très en amont l'entreprise chargée de la réalisation avec l'équipe de maîtrise d'œuvre, architectes et ingénieristes. ▷

Le coût de 19,1 M€ HT est assurée pour 9,9 M€ par des subventions (Europe, État Français, Région Bretagne, Conseil Départemental du Finistère) et pour 9,2 M€ par l'autofinancement de Brest Métropole.

### L'ORGANISATION DU PROJET

Le marché de Conception-Réalisation a été attribué le 26 novembre 2014 au groupement piloté par Bouygues Tp Rf et comprenant des cotraitants suivants :

- Bouygues Bâtiment Grand Ouest pour le génie civil ;
- Bmf Bartholet Remontées Mécaniques pour le process téléphérique ;
- Le cabinet d'architecture Halet-Vilette ;
- Le bureau d'études Setec tpi pour l'ingénierie génie civil la géotechnique, les courants forts/faibles et les sujets FMDS (sous-traitants Terrasol et Setec its) ;
- Dcsa ingénierie spécialisée en remontées mécaniques.

La mission de contrôle technique a été assurée par le groupement Tim/Socotec. Le contrôle extérieur de la charpente métallique a été réalisé par l'Institut de Soudure Industrie, la mission géotechnique G4 par Ginger Cebtp. Le coordonnateur SPS était représenté par l'agence Tpfifi.

Compte tenu du délai serré pour la réalisation des études et des travaux (2 ans), une organisation efficace a été mise en place dès la phase concours jusqu'à la réception des travaux.

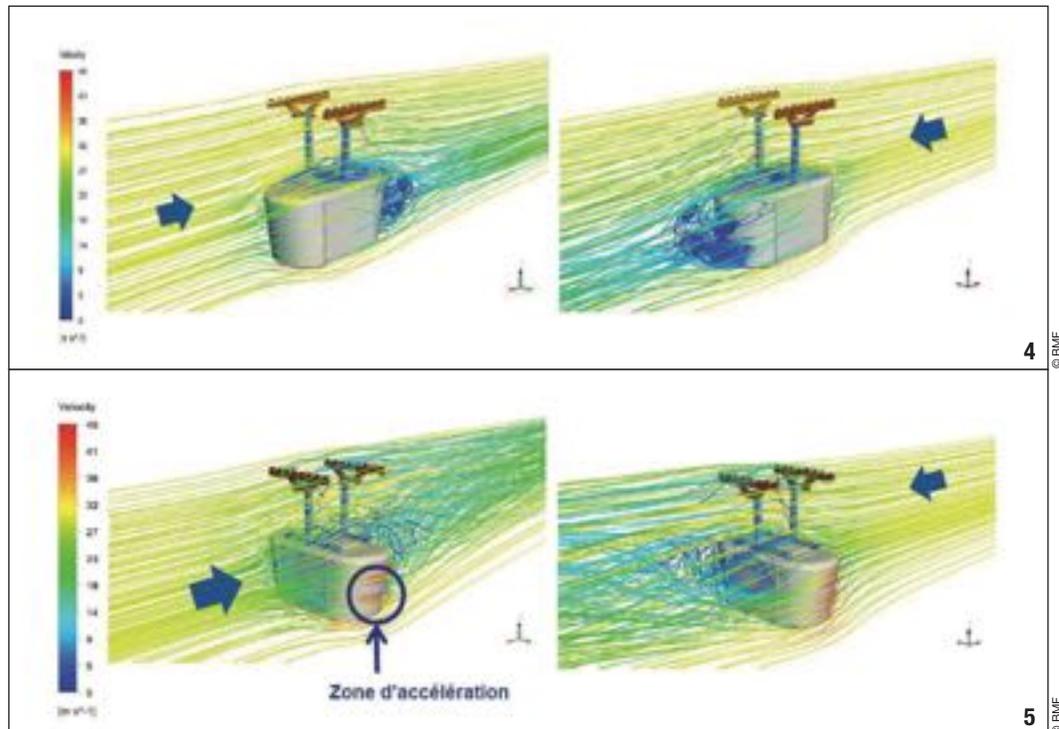
Cette organisation constituée de cinq cellules (technique, interfaces externe et interne, sécurité, travaux, essais/mise en service) a permis un traitement exhaustif des nombreux sujets. Une attention majeure a été portée sur le respect rigoureux de la réglementation en vigueur et sur la qualité des études et des travaux.

### DE LA CONCEPTION À LA RÉALISATION

#### SYSTÈME DE TRANSPORT INNOVANT

Si l'on pouvait penser que tout avait été imaginé sur les téléphériques, la conception du projet de Brest a démontré le contraire. L'innovation, en effet, a été le maître mot :

- **L'optimisation** : Une intégration parfaite dans les contraintes volumétriques des Ateliers et surfaciques du secteur de Siam grâce au « saut-de-mouton » (figure 3) et sa voie unique permettant de gagner une place significative au niveau de l'emprise des stations.



- **La technologie** : Le téléphérique de Brest combine les avantages de plusieurs technologies bien connues en remontées mécaniques : un bi-câble qui permet d'embarquer des cabines de forte capacité (60 personnes) et une technologie voie large du type Funitel pour offrir une très bonne résistance et une meilleure stabilité au vent (figures 4 et 5).

- **Les cabines** : dessinées par le cabinet de design Avant Première, les cabines s'intègrent parfaitement dans le cadre urbain du téléphérique et dans la continuité du tramway de la ville. La tech-

4 & 5- Simulations numériques des effets du vent.  
6- Mise en valeur de la machinerie dans la station Atelier.

4 & 5- Numerical simulations of wind effects.  
6- Development of the machinery in the Atelier station.

nologie embarquée des cabines offre des avancées technologiques significatives : un réglage automatique de l'horizontalité des cabines en gares, un hublot central pour découvrir les zones survolées par le téléphérique et des vitres s'opacifiant automatiquement au passage des zones résidentielles du trajet.

- **La récupération d'énergie** : lors de la descente des cabines depuis le pylône vers les stations, le freinage produit de l'énergie qui est stockée dans des super-capacités et qui est consommée durant le trajet suivant.
- **Un système de récupération intégré** : ce système garantit le rapatriement des cabines en station dans l'ensemble des cas connus de défaillance technique.
- **Un système adapté à l'urbain** : le téléphérique offre un haut niveau de disponibilité, sans opérateur en stations ou dans les cabines, avec des modes de fonctionnements optimisés.

### STATION ATELIERS

Une des difficultés du projet, tant architecturale que technique, a été l'insertion de la station en rive droite dans l'emprise contrainte par la trame de la structure existante des Ateliers des Capucins.

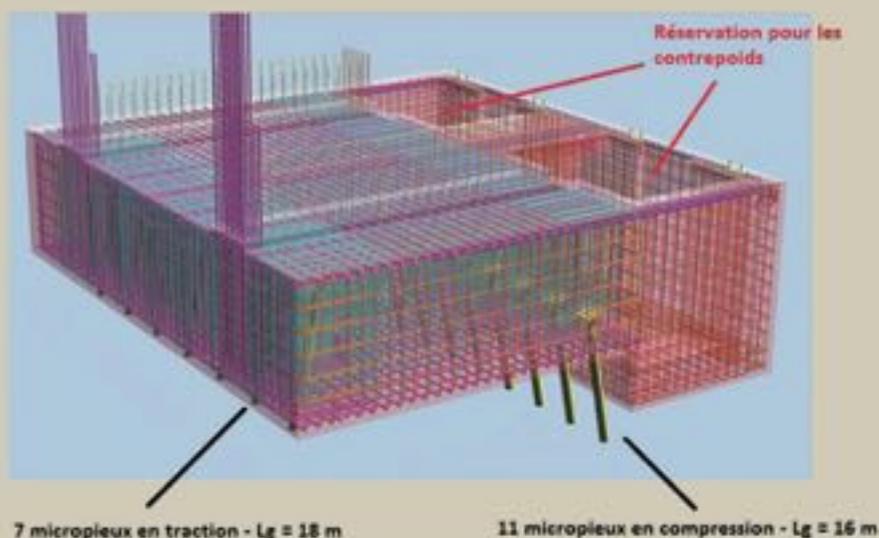
La station est organisée sur deux niveaux :



6

© ANNE-CLAUDE BARBIER

## MODÈLE DU MASSIF D'ANCRAGE (STATION ATELIER)



© BOUYGUES TP RF

7

→ Le niveau 0, de plain-pied avec le parvis extérieur, accueille l'ensemble des équipements techniques nécessaires au bon fonctionnement du téléphérique, ainsi que les locaux de maintenance et une réserve. Ce niveau est directement accessible de l'extérieur par le biais d'un large portail à deux vantaux, permettant le cas échéant la sortie, d'une cabine vers un atelier de maintenance ;

→ Le niveau 1 (niveau quais) est de plain-pied avec la galerie marchande et l'étage de la médiathèque. Cet espace est schématiquement divisé en deux, avec, sous la travée de rive de la toiture, les quais de « départ » et « arrivée » de part et d'autre de la position d'arrêt de la cabine, les structures porteuses propres au téléphérique (principalement les portiques de support des sabots et leurs passerelles d'entretien), ainsi que le poste de contrôle et de commande (PCC). De chaque côté, un grand escalier et une cage d'ascenseur (hors projet) permettent de descendre au niveau du parvis extérieur. Sous la deuxième travée de la halle, derrière le PCC, se trouvent un espace de circulation faisant la liaison entre les quais et la rue couverte du bâtiment. Une paroi vitrée ceinture la zone technique sur trois faces et permet la visibilité sur la machinerie (figure 6), les voiles d'ancrage des câbles et les organes mécaniques.

### 7- Modèle du massif d'ancrage (station Atelier).

### 8- Réalisation des voiles d'ancrage (station Atelier).

### 7- Model of the anchoring foundation (Atelier station).

### 8- Execution of the anchoring walls (Atelier station).



8  
© BMF

## LE MASSIF POIDS ET LES VOILES D'ANCRAGE

Dans la station Ateliers, les câbles porteurs sont ancrés sur des voiles d'ancrage en béton armé reposant sur un massif poids (8,50 m x 8,15 m x 1,80 m) fondé sur 18 micropieux de type IV (figures 7 et 8).

L'implantation de ces voiles a fait l'objet d'un point de vigilance particulier compte tenu de la précision requise pour le calage des câbles porteurs.

## LE PYLÔNE

Le pylône (figure 9) est un ouvrage situé au sein de la base navale à quasi équidistance des stations Jean-Moulin

et Ateliers. Les entraxes au sol sont de 10,00 m, sa structure repose sur 4 semelles fondées sur micropieux de type IV et reliées par des longrines en béton armé. Lors de la réalisation des forages, des arrivées d'eau consécutives ont nécessité le traitement du sol de fondation par injections.

La forme du pylône est une tour quadri-pode dont la structure treillis est composée de profils en H et de cornières de triangulation. L'ensemble est assemblé mécaniquement et revêtu d'une protection anticorrosion C5 Ma ANV du même gris foncé que la structure principale de la station Jean-Moulin. La silhouette de ce pylône n'est pas sans rappeler la tour de la grande grue « La Consulaire » qui domina le port militaire pendant trois quarts de siècle, quelques mètres plus en aval.

La hauteur totale du pylône de 78,50 m a été conditionnée par une contrainte majeure du projet : le tirant d'air requis par le passage des bateaux de la Marine. En effet, le gabarit requis est au niveau 51,79 m, sur une largeur de 60 m. À son sommet, le pylône supporte les quatre sabots de guidage des câbles. Pour garantir une accélération centripète ressentie acceptable, le rayon des sabots a été défini à 28 m en fonction de la vitesse maximale d'exploitation de 7,5 m/s (soit 2,0 m/s<sup>2</sup>). Sa géométrie permet le croisement superposé des deux cabines.

## STATION JEAN-MOULIN

Rive gauche, la station Jean-Moulin se présente comme un élément d'animation urbaine le long du boulevard éponyme, sous la forme d'un ouvrage en porte-à-faux au sommet du mur de l'Arsenal. Par là même, elle devient tout naturellement un belvédère privilégié surplombant la Penfeld une vingtaine de mètres plus bas (figure 10).

La solution aérienne proposée est en prise directe avec la ville, de plain-pied avec le boulevard et la courte rue Ducouëdic dont l'aménagement piétonnier assure le lien avec la station Château de la ligne du tramway située rue de Siam. Pour cette station, il a été opté pour un parti qui permette de ne pas occulter la perspective vers la rive droite et qui mette en valeur la technologie de l'ouvrage, en glissant les toitures et les façades sous les sabots et leurs passerelles d'entretien. Deux poteaux prennent appui au niveau du quai 20,50 m plus bas, implantés à l'arrière des sabots, et ils supportent la plate-forme en porte-à-faux sur trois côtés (figure 11).

Les efforts transmis par les câbles porteurs et tracteurs, d'environ 4 MN, sont repris par une charpente métallique (triangulaire en plan et inclinée en élévation) scellée sur une longrine en béton armé coulée sur toute la largeur de la station au sommet du mur de l'Arsenal. Ces efforts sont repris par des tirants précontraints (4 inclinés et 2 verticaux) ancrés dans le substratum rocheux.

Cette structure métallique porteuse, projetée au-delà du mur de l'Arsenal, fait référence dans son dessin et son dimensionnement - tout comme le pylône - à la puissance de l'industrie portuaire.

## LA SÉCURITÉ AU CŒUR DU PROJET

### LA DÉMARCHÉ DE DÉMONSTRATION DE LA SÉCURITÉ

Le contexte urbain du téléphérique de Brest a imposé de se conformer à la fois à la réglementation relative aux Systèmes de Transports Publics Guidés et à la réglementation relative aux Remontées Mécaniques. Ces deux textes fixent des objectifs et des exigences de sécurité en matière de conception, de réalisation, d'exploitation et de maintenance.

La réglementation relative aux systèmes de Transports Publics Guidés oblige le maître d'ouvrage à établir des dossiers de sécurité (Dossier de Définition de Sécurité, Dossier Préliminaire de Sécurité, Dossiers Jalons de Sécurité et Dossier de Sécurité) afin de démontrer que le système de transport présente un niveau de sécurité optimal.

Ce processus de démonstration du niveau de sécurité du téléphérique de Brest a été initié par le maître d'ouvrage par la réalisation du Dossier de Définition de Sécurité et poursuivi par le Groupement de Conception-Réalisation par la réalisation des autres dossiers de sécurité qui constituaient des documents majeurs et critiques pour le projet, puisque leur validation conditionnait le démarrage des travaux et la mise en service.

Bien évidemment, des systèmes de téléphériques ont été réalisés et exploités de longue date en France, mais la difficulté majeure de la démonstration de la sécurité pour le téléphérique de Brest résidait dans le fait qu'il s'agissait du premier téléphérique urbain de France et que, par conséquent, il n'existait pas de système de référence pour démontrer le niveau de sécurité requis au niveau du système global.

La démonstration de sécurité développée tout au long du projet au travers des dossiers de sécurité s'est donc appuyée sur :

- Une analyse de risques au niveau du système global ;
- Des analyses de sécurité réalisées au niveau des sous-ensembles et constituants ;
- L'ensemble de la démarche pour l'obtention des agréments CE ;
- Le suivi et la clôture du Registre des Situations Dangereuses (RSD) pour la mise en service du système de transport ;
- Le respect du référentiel réglementaire et technique en vigueur ;
- Des analyses de sécurité particulières spécifiques.

**9- Vue du pylône.**

**10- Vue de la station Jean-Moulin depuis le boulevard Jean Moulin.**

**9- View of the pylon.**

**10- View of Jean-Moulin station from Jean Moulin boulevard.**



9

© ANNE-CLAUDE BARBIER



10

© ANNE-CLAUDE BARBIER

## DES ANALYSES PARTICULIÈRES SPÉCIFIQUES

Certains aspects de l'exploitation du téléphérique méritent une attention particulière et les dispositifs correspondants ont fait l'objet d'analyses de sécurité particulières approfondies. Il s'agit notamment de la récupération intégrée des cabines en cas d'avarie afin de pouvoir rapatrier les cabines vers les stations dans tous les cas probables envisagés, ou encore de l'exploitation automatique du système.

**11- Structure métallique de la station Jean-Moulin.**

**11- Steel structure of Jean-Moulin station.**



© ANNE-CLAUDE BARBIER

11

## LES DIFFÉRENTS REGARDS

Le projet a fait l'objet jusqu'à sa mise en service puis au-delà de plusieurs regards sur l'ensemble des aspects sécurité dont le premier a été porté par la Cellule FMDS du Groupement de Conception-Réalisation au travers des Dossiers de Sécurité.

Le second regard a été porté par un Organisme Qualifié Agréé, Tim Ingénierie, sur la base des Dossiers de Sécurité.

Puis le troisième regard a été porté par les Services Techniques de Remontées et des Transports Guidés (Strmtg).

Plusieurs réunions et échanges entre ces regards ont permis d'atteindre un niveau de sécurité autorisant la mise en service du téléphérique. □

- 1- Passagers Par Heure et Par Direction : unité de mesure du débit.
- 2- Groupement des Autorités Responsables de Transport.
- 3- Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés.

## PRINCIPALES QUANTITÉS

### STATION ATELIER :

- Massif de fondation : 125 m<sup>3</sup> de béton, 17,5 t d'acier et 291 m de micropieux
- Voiles supports des tomes d'ancrage des câbles porteurs : 2 x 45 m<sup>3</sup> de béton et 3,5 t d'acier
- Structure métallique : 20 t de charpente

### PYLÔNE :

- Fondations : 100 m<sup>3</sup> de béton, 13 t d'acier et 416 m de micropieux
- Structure métallique : 200 t de charpente

### STATION JEAN-MOULIN :

- Longrine de fondation : 56 m<sup>3</sup> de béton, 11,5 t d'acier et 247 m de tirants d'ancrage
- Structure métallique : 120 t

### CÂBLES TÉLÉPHÉRIQUE :

- 2510 m de câble clos D50mm
- 1700 m de câble toronné D25mm

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Brest métropole

**MAÎTRISE D'OUVRAGE DÉLÉGUÉE :**

SemTram (Groupement momentané d'entreprise entre Brest Métropole Aménagement et Egis Rail)

**GROUPEMENT DE CONCEPTION-RÉALISATION :**

Bouygues Tp Rf - Bouygues Bâtiment Grand Ouest - Bmf - Setec tpi - Halet-Villette - Dcsa

**SOUS-TRAITANT :**

Cbeton (BET béton), Smb (charpente métallique), Mecamont (montage téléphérique), Bouygues Énergie & Service (électricité), La Garonnaise de Forage (tirants d'ancrage) ; A.F.R. (micropieux) ; Baume (charpente de couverture) ; Bretagne Métallerie (serrurerie) ; Seirel (automatisme système)

**CONTRÔLE TECHNIQUE :** Socotec

**COORDONATEUR SPS :** Tpfi

## ABSTRACT

### THE BREST CABLE CAR, THE FUTURE OF URBAN MOBILITY

SÉBASTIEN PIENNE, SETEC TPI - FABIEN PEYRARD, BMA/SEM TRAM - MICHEL VILLETTE, HALET-VILLETTE - NICOLAS CHAPUIS, BMF - CHRISTOPHE TAMBOURIN, DCSA

The consortium formed by Bouygues Tp Rf, Quille construction, Bmf Remontées mécaniques and Halet Villette Architectes, with engineering offices Setec and Dcsa, has built the first urban cable car in France, designed to fit in with an industrial and port environment. The two-way system with the cabs crossing one another vertically links the right-bank station developed inside the 'Ateliers des Capucins' workshops to the left-bank station located above ground and overlooking the naval base. The cable car forms part of the 'Bibus' network in Brest, favouring intermodality and soft modes of transport in the centre of the urban area. By establishing 'safety files' it was possible to demonstrate that the transport system offers an optimal safety level. □

### EL TELEFÉRICO DE BREST, EL FUTURO DE LA MOVILIDAD URBANA

SÉBASTIEN PIENNE, SETEC TPI - FABIEN PEYRARD, BMA/SEM TRAM - MICHEL VILLETTE, HALET-VILLETTE - NICOLAS CHAPUIS, BMF - CHRISTOPHE TAMBOURIN, DCSA

Con un diseño que se integra en un entorno industrial y portuario, el consorcio Bouygues Tp Rf - Quille construction - Bmf Remontées mécaniques - Halet Villette Architectes - gabinetes de estudios Setec y Dcsa ha construido el primer teleférico urbano de Francia. El sistema en vaivén con un cruce vertical de las cabinas une la estación de la orilla derecha, habilitada dentro del centro cultural Les Ateliers des Capucins, y la estación de la orilla izquierda en superficie y en voladizo sobre la base naval. El teleférico se integra en la red Bibus de Brest, lo que favorece la intermodalidad y los modos de desplazamiento no motorizados en el centro de la aglomeración. Los informes de seguridad elaborados han demostrado que el sistema de transporte presenta un nivel de seguridad óptimo. □



© GEOS INGENIEURS CONSEILS

# TRAVAUX DE CONFORTEMENT PAR MICROPIEUX DES PILES DU PONT D'IÉNA À PARIS

AUTEURS : LAURENT SAUSSAC, INGÉNIEUR PRINCIPAL, GEOS INGENIEURS CONSEILS - STÉPHANE CURTIL, DIRECTEUR, GEOS INGENIEURS CONSEILS - AMBROISE DUFAYET, CHEF DE LA SUBDIVISION DES OUVRAGES D'ART SEINE, MAIRIE DE PARIS

DEPUIS QUELQUES ANNÉES, L'ÉTAT GÉNÉRAL DU PONT D'IÉNA À PARIS SE DÉGRADAIT PROGRESSIVEMENT COMME EN TÉMOIGNENT LES FISSURES ET LES ÉCLATEMENTS DE MAÇONNERIE QUE CHACUN POUVAIT OBSERVER DEPUIS LES QAIS DE SEINE. UNE OPÉRATION DE RESTAURATION DE GRANDE AMPLEUR A ÉTÉ ENGAGÉE PAR LA MAIRIE DE PARIS AFIN DE PRÉSERVER L'OUVRAGE AVEC, DANS UN PREMIER TEMPS, LA CONSOLIDATION IMPÉRATIVE DES FONDATIONS DES PILES EN RIVIÈRE. CE CONFORTEMENT A PERMIS DE BLOQUER LES MOUVEMENTS DU PONT ET D'ASSURER LA PÉRENNITÉ D'UN DES OUVRAGES LES PLUS EMBLÉMATIQUES DE PARIS.

## PROBLÉMATIQUE RENCONTRÉE

La construction du pont d'Iéna entre l'actuel Champ de Mars et le Palais du Trocadéro s'est achevée en 1814. Il s'agit d'un ouvrage historique en maçonnerie dont les piles reposent sur une centaine de pieux en bois. Entre 1935 et 1937, le pont fut élargi de 19 à 35 m par l'ajout, de part et d'autre,

de deux ouvrages latéraux en béton armé habillés d'un parement extérieur en pierre, fondés sur des pieux en béton armé battus à l'intérieur d'une enceinte en palplanches et ancrés dans les argiles plastiques. Les trois ouvrages sont composés de 5 arches de 28 m de portée chacune. Les piles de l'ouvrage ancien seront numérotées P1 à P4 de la rive gauche vers la rive droite.

**1- Vue du pont  
depuis la berge  
sud.**

**1- View of the  
bridge from  
the south bank.**

Après la construction de l'ouvrage central en maçonnerie, au moment du décentrement des voûtes, des tassements de l'ordre de 10 à 15 cm auraient été observés.

En janvier 2012, un système d'instrumentation et d'auscultation par cible topographique a été mis en place afin de contrôler les mouvements de l'ouvrage. Les mesures ont mis en évi-

dence un tassement différentiel sensible entre l'ouvrage en maçonnerie et les élargissements.

Les piles P2 à P4 du pont historique ont vraisemblablement tassé de plusieurs dizaines de centimètres depuis les travaux d'extension des années 30 suite à un report de charge du nouvel ouvrage sur l'ancien. Ces déplacements excessifs se sont traduits par des désordres multiples et de plus en plus marqués : fissures transversales au niveau de la chaussée, fractures et déformations au niveau des douelles, mouvement de l'ouvrage en béton entre l'ouvrage ancien et les ouvrages récents en béton. Le suivi de l'auscultation topographique montre que les tassements et les désordres sont évolutifs sans palier de stabilisation des vitesses (figure 1). Face à un ouvrage dégradé à la pathologie complexe, le comité technique chargé d'apprécier les risques techniques associés à cet ouvrage a proposé un renforcement de la portance verticale des trois appuis présentant les tassements les plus importants. La méthode de confortement retenue pour les trois piles P2 à P4 a été la réalisation de micropieux forés depuis la partie supérieure du tablier et traversant toute la maçonnerie historique pour venir s'ancrer dans le bon sol.

## CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE

Les reconnaissances de sol menées dans le cadre des diagnostics et des études de projet ont mis en évidence la succession des terrains suivants :

- Des Alluvions sablo-limoneuses sur une épaisseur de l'ordre de 3,5 m (jusqu'à 19/20 ortho) avec des caractéristiques mécaniques faibles ( $p_{l moy} = 0,6 \text{ MPa}$  -  $E_{M moy} = 5 \text{ MPa}$ ) ;
- Des Alluvions sablo-graveleuses sur 1 à 2 m (jusqu'à 18/19 ortho) avec de bonnes caractéristiques ( $p_{l moy} = 3 \text{ MPa}$  -  $E_{M moy} = 20 \text{ MPa}$ ) ;
- L'Argile Plastique jusqu'à 4 ortho avec des caractéristiques croissantes avec la profondeur,  $p_l$  de 0,9 à 2 MPa et  $E_M$  de 8 à 20 MPa ;
- Les Marnes de Meudon qui constituent la couche d'ancrage des micropieux avec de très bonnes caractéristiques mécaniques ( $p_{l moy} > 5 \text{ MPa}$  -  $E_{M moy} = 200 \text{ MPa}$ ).

2- Document d'archive - élévation de la pile P2.

2- Archive document - elevation view of pier P2.

## HISTORIQUE DE L'OUVRAGE - DESCENTE DE CHARGE

Les documents d'archives montrent que les pieux en bois ont une longueur d'environ 7 m et sont donc ancrés de 2/3 m dans les argiles plastiques assez peu compactes soit vers 16,0 ortho (figure 2). Les pieux en béton armé battus des élargissements latéraux ont une section de 35x35 cm et semblent ancrés plus profondément (arase inférieure variable comprise entre 10,0 et 14,9 ortho).

Les informations recueillies sont celles figurant sur les plans de l'élargissement car aucun plan de l'époque de la construction de l'ouvrage n'a pu être retrouvé. La descente de charge établie par le bureau d'étude structure montre que les pieux en bois reprenaient à l'origine environ 40 t chacun et que l'élargissement, dont une partie du tablier repose sur les piles anciennes, a majoré la charge totale de 30% pour atteindre approximativement 52 t.

## ANALYSE DES TASSEMENTS DES APPUIS

L'analyse des différentes inspections menées permet d'estimer les tassements absolus totaux des appuis depuis la construction de l'ouvrage au 19<sup>e</sup> siècle :

- Culées : tassements faibles.
- Pile P1 : 15 cm.
- Pile P2 : 45 cm.
- Pile P3 : 52 cm.
- Pile P4 : 44 cm.

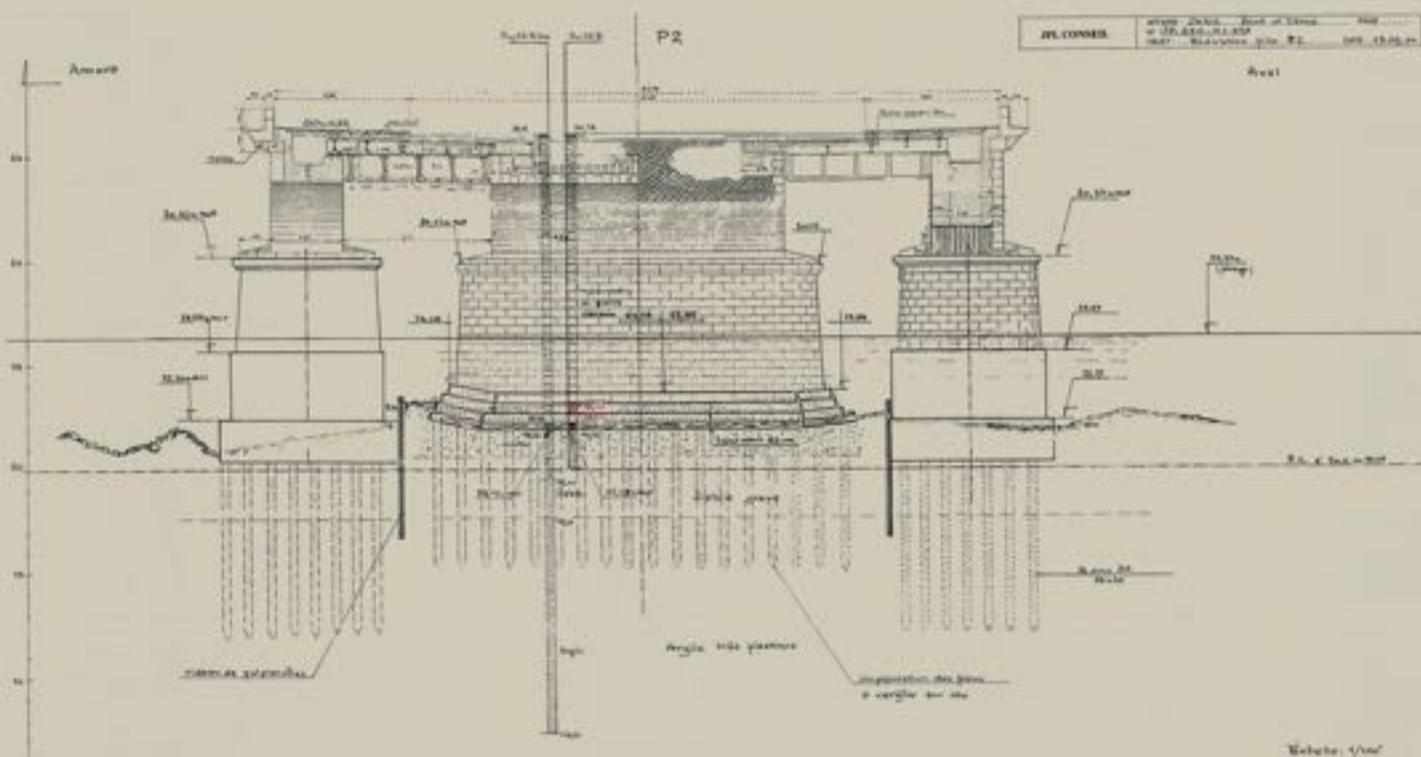
La construction de l'élargissement a conduit à une majoration de la descente de charge sur les appuis en maçonnerie. La mesure du basculement des poutres qui supportent la chaussée entre la partie centrale en maçonnerie et les élargissements permet d'estimer la part de tassement produite depuis 1937, date de la fin des travaux de doublement des voies :

- Pile P1 : 4 cm.
- Pile P2 : 22 cm.
- Pile P3 : 34 cm.
- Pile P4 : 18 cm.

Les piles P2 à P4 ont ainsi acquis la moitié des tassements depuis la construction de l'élargissement sous un accroissement de charge totale de 30% seulement ce qui montre qu'on est probablement dans une phase de fluage après consolidation ou après passage dans le domaine élastique.

Le suivi topographique mis en œuvre en 2012 a montré qu'au bout d'un an les piles P2 et P3 avaient tassé de 5 mm supplémentaires alors que les autres appuis n'ont pas montré de mouvements importants. ▶

## DOCUMENT D'ARCHIVE - ÉLÉVATION DE LA PILE P2



Il apparaît donc que les tassements ne sont pas stabilisés ce qui nécessite la mise en œuvre rapide d'un confortement.

L'étude des solutions envisageables a abouti à une solution de reprise des charges par micropieux car :

- L'intervention peut se faire depuis la chaussée, limitant ainsi les travaux depuis la Seine et n'imposant qu'une restriction ponctuelle de circulation fluviale et de véhicules ;
- Le transfert des charges se fera progressivement des pieux en bois vers les fondations complémentaires ;
- L'impact sur les pieux en bois reste faible au regard d'autres techniques comme le jet-grouting ;
- Les reconnaissances ont montré que la maçonnerie des piles présentait un bon état général et qu'elle pouvait donc assurer le transfert des charges vers les micropieux qui les traverseraient.

#### DIMENSIONNEMENT

Les études géotechniques G2-PRO ont montré que les coefficients de sécurité par rapport à la charge de rupture en termes de portance étaient de 1,4 vis-à-vis des charges totales et 1,7 vis-à-vis des charges permanentes seules. L'objet du confortement est la stabilisation des affaissements des trois appuis sur lesquels les tassements les plus importants ont été mesurés. Pour assurer la stabilité de ces piles, un coefficient de sécurité de 2 par rapport à la charge de rupture en portance est recherché, soit une augmentation du coefficient de sécurité de 40 %.

#### PRINCIPE DES TRAVAUX DE CONFORTEMENT

La solution retenue en phase projet a été la réalisation de 12 micropieux à travers de chacune des trois piles P2 à P4 depuis la chaussée. La mission G4 de suivi géotechnique de l'exécution a été assurée par Geos Ingénieurs Conseils en collaboration avec la maîtrise d'œuvre générale de la Ville de Paris. L'entreprise en charge de la réalisation des micropieux était l'entreprise Spie Fondations.

La charge à la rupture unitaire recherchée par micropieux était de 325 t ce qui a conduit à un dimensionnement de micropieux de type 3 de 46 m de longueur ancrés de 13 m dans les marnes raides avec un scellement dans la maçonnerie de la pile sur 12 m (tubes 139,7 mm et d'épaisseur 20 mm frettés par soudage de spires HA pour assurer de transfert de



charge de l'ouvrage vers les micropieux et des micropieux vers le sol (figure 3)). Afin de valider la valeur du frottement latéral ( $q_s$ ) dans les Marnes de Meudon, sous les Argiles Plastiques, un micropieu d'essai préalable à la rupture a été réalisé depuis les quais de la rive gauche au niveau de la culée du pont. L'analyse de la diagraphie du forage a permis de déterminer la limite argiles/marnes afin d'assurer un scellement dans la bonne couche d'ancrage.

L'essai est classiquement effectué par l'intermédiaire de câbles de précontrainte scellés à l'intérieur du tube (figure 4). Une fois le micropieu injecté avec une partie libre délimitée par un tube PVC en tête, les câbles ont été introduits à l'intérieur du tube dans le coulis de scellement frais avant la prise. L'essai a consisté à appliquer une traction sur le tube de micropieu par l'intermédiaire d'un vérin et à mesurer le déplacement du tube d'armature en tête de micropieux jusqu'à la traction d'épreuve si possible (de l'ordre de 200 t) ou la rupture par défaut d'adhérence du micropieu au terrain.

L'essai a été conduit jusqu'à la traction d'épreuve sans que le déplacement limite n'ait été atteint et sans apparition de fluage ce qui a permis de valider un  $q_s$  de 450 kPa qui confirme la valeur retenue dans les études de projet de 300 kPa.

La procédure de réalisation mise en œuvre par Spie Fondations était la suivante :

- Réalisation d'un avant trou de reconnaissance au tricône, à l'eau, en diamètre 90 mm avec enregistrement des paramètres de forage jusqu'au platelage bois situé sous les piles pour vérifier si l'implantation du micropieu est à l'aplomb ou non d'un pieu bois ;

**3- Tubes avec frettage dans la zone de scellement dans la maçonnerie des piles.**

**4- Vérin mis en œuvre pour le micropieu d'essai.**

**3- Tubes with hooping in the area of pier embedding in the masonry.**  
**4- Jack used for the test micropile.**

4

© GEOS INGÉNIEURS CONSEILS

- Carottage au carottier, à l'eau, en Ø 250 mm, avec contrôle de verticalité jusqu'à la base du platelage bois ;
- Forage dans le terrain, sous fluide de forage, au trilame perdu Ø 200 mm (figure 5) ;
- Substitution du fluide de forage par le coulis de scellement, mise en place de l'armature et injection de scellement. Pour l'exécution des micropieux de l'ouvrage, compte tenu de la hauteur importante de scellement, il a été prévu une injection type IGU renforcée en effectuant l'injection à l'obturateur simple en 5 passes remontantes de 6 m environ.

Étant donné la sensibilité de l'ouvrage et préalablement à tous travaux de forage, un cerclage métallique des piles sur trois niveaux avec barres d'ancrage horizontales a été mis en œuvre (figure 6). La position des pieux en bois d'origine de chaque appui a été relevée par des reconnaissances subaquatiques.

#### 5- Opération de forage des micropieux.

#### 5- Micropile drilling operation.

Pendant toute la durée des travaux, les mesures d'auscultation des mouvements de l'ouvrage se sont poursuivies avec des mesures quotidiennes (figure 7) pendant les phases critiques et deux mesures par semaine pour les autres phases. Les mesures sont réalisées à partir de cibles topographiques fixées sur l'ouvrage. Le dispositif comprenait 4 cibles par culée, 2 cibles par pile construite lors de l'élargissement. Des repères fixes ont également été relevés au niveau des quais. L'interprétation des mesures en relation avec les différentes phases de travaux a été faite en continu pendant les travaux dans le cadre de la mission géotech-

nique G4 de Geos Ingénieurs Conseils. L'étude de projet avait souligné le risque d'une possible accélération des tassements des appuis liés à une perte de capacité portante suite à une réduction du frottement latéral par un remaniement du sol autour des pieux en bois au moment du forage des micropieux. La surveillance pendant les travaux devait permettre de contrôler l'impact de la réalisation des micropieux et de prévenir des tassements anormaux liés à des aléas de travaux qui n'auraient pas été anticipés.

Les travaux de carottage des piles n'ont pas eu de conséquence sur le comportement de l'ouvrage (pas de mouvement significatif). Par contre, les premiers forages dans le terrain ont conduit à des pertes importantes de fluide de forage au niveau de l'interface platelage bois/terrain à la base des piles qui se sont traduites par une forte accélération des vitesses de tassements des appuis : en une semaine 8 à 9 mm au niveau de P2, 14 à 15 mm au niveau de P3 et 12 à 13 mm au niveau de P4. Le fluide de forage, en charge jusqu'au niveau du tablier du pont, soit plus de 10 m au dessus du niveau de la Seine, a provoqué un effet de chasse sur le mortier de pose altéré et sur les terrains sableux sous la base de la pile. Ce phénomène de perte de capacité portante sous la base des piles, conjugué avec les pertes de frottement latéral des pieux bois suite au remaniement des argiles au cours du forage est à l'origine des tassements importants mesurés (25 à 30 mm) qui se sont poursuivis jusqu'à la mise en œuvre et au scellement des armatures des micropieux. Ces pertes de fluide de forage sous la base des piles étaient une alerte forte quant au risque de défaut de scellement des micropieux en partie haute au niveau de la maçonnerie. Une adaptation de la procédure a été proposée et validée par la maîtrise d'œuvre et par Geos Ingénieurs Conseils.

Lorsque des pertes significatives étaient constatées au forage, celui-ci était alors arrêté de manière à procéder à une injection de comblement au moyen d'un coulis ciment-bentonite chargé au sablon, mis en œuvre gravitairement depuis la base de l'outil de forage avec pour objectif de combler les vides et consolider les terrains décomprimés à l'interface entre le platelage bois de fondation et les terrains. L'injection est stoppée lorsqu'une résurgence au niveau de la chaussée est constatée ou lorsque le volume de coulis injecté par le train de tige atteint 1 m<sup>3</sup>.





6

© GEOS INGENIEURS CONSEILS

En absence de résurgence, l'opération est renouvelée. Si le volume total de 2 m<sup>3</sup> est atteint sans résurgence, un adjuvant silicaté est alors ajouté au coulis pour accélérer la prise. Au final, ces opérations de traitement préalables ont conduit à la mise en œuvre de plus de 100 m<sup>3</sup> de coulis-sablon pour les trois piles confortées.

Cette opération majeure de confortement des fondations historiques (figure 8) a permis de stabiliser rapidement les tassements et d'apporter un confortement fiable à long terme.

Le comportement historique constaté des fondations avec un fluage continu était un indice robuste de l'état de stabilité critique de l'ouvrage dont la capacité portante des fondations mobilisait à la fois les pieux bois (fondations profondes) avec report d'une partie des charges en profondeur et les sols sous le platelage en bois (fondations superficielles).

La perte de cette composante de portance des terrains superficiels en cours de travaux a immédiatement induit un report de charge sur les pieux en bois avec accélération des déformations et du fluage.

Face à une situation critique de déstabilisation des fondations, les injections de comblement et de traitement engagées en cours de chantier ont apporté une solution géotechnique adaptée de confortement provisoire de l'ouvrage permettant la poursuite des travaux de renforcement par micropieux.

#### BILAN DES TRAVAUX

La stabilité du pont d'Iéna, ouvrage symbolique de la ville de Paris inscrit à l'inventaire des monuments historiques, était compromise par un mécanisme de report des charges des élargissements de 1935 sur l'ouvrage initial datant du début du 19<sup>e</sup> siècle en maçonnerie fondé sur pilotis bois.

Le diagnostic préalable a montré que l'ouvrage a subi des dommages importants (fissures, épaufrures, torsion des

**6- Cerclage des piles.**

**7- Suivi topographique du déplacement vertical des piles.**

**6- Pier hooping.**

**7- Topographic monitoring of vertical movement of the piers.**

poutres métalliques...) qui sont apparus progressivement sur les deux parties du pont (nouvelle et ancienne), nécessitant une intervention programmée.

Compte tenu des contraintes liées aux travaux en Seine, la technique de confortement retenue a été la mise en œuvre de 3 séries de 12 micropieux réalisés depuis la chaussée sur trois des quatre piles de l'ouvrage ancien. L'altération du sol sous le platelage bois des piles avec le courant de la Seine,

#### SUIVI TOPOGRAPHIQUE DU DÉPLACEMENT VERTICAL DES PILES



7

© SITES



8

© GEOS INGENIEURS CONSEILS

la possible dégradation des pieux bois au fil des ans et le remaniement des terrains, jusqu'ici confinés, au moment du forage des micropieux ont conduit, en cours de travaux, à des pertes de fluide de forage puis de coulis de scellement et à des tassements inattendus marqués. Dans ce contexte la mission G4 de supervision géotechnique de l'exécution confiée par la Mairie de Paris à Geos Ingénieurs Conseils a trouvé tout son sens puisqu'elle a été garante d'une excellente réactivité pour l'interprétation de phénomènes géotechniques inattendus, pour la définition des mesures compensatoires d'urgence pour la préservation de l'ouvrage et pour l'accompagnement de l'entreprise Spie Fondations dans la définition des adaptations des méthodes des travaux géotechniques spéciaux. Cette démarche de suivi inté-

gré du comportement géotechnique de l'ouvrage en lien étroit avec les services de maîtrise d'œuvre de la Mairie de Paris a permis de prendre rapidement les mesures conservatoires adéquates afin de garantir le bon achèvement des travaux de mise en place des micropieux et la pérennité à long terme de l'ouvrage. □

**8- Mobilisation de deux ateliers de forage suite aux pertes de fluide de forage.**

**8- Mobilisation of two drilling rigs following drilling fluid losses.**

## QUELQUES CHIFFRES...

**FORAGE MICROPIEUX : 36 u, hauteur moyenne 46 m, total 1 656 m**

**ARMATURES MICROPIEUX : tubes 139 mm épaisseur 20 mm, total 97 t d'acier**

**VOLUME MOYEN DE COMPLEMENT SOUS LES PILES : 100 m<sup>3</sup> de coulis bentonite-ciment + sablon**

**DURÉE DES TRAVAUX : 2x7 semaines environ**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE : Mairie de Paris**

**MAÎTRE D'ŒUVRE GÉNÉRAL : Mairie de Paris - Service du Patrimoine de Voirie - Section Seine et Ouvrages d'Art**

**MAÎTRE D'ŒUVRE GÉOTECHNIQUE SUIVI DE CHANTIER : Geos Ingénieurs Conseils**

**MAÎTRE D'ŒUVRE GÉOTECHNIQUE ÉTUDES : Fondasol**

**ENTREPRISE : Spie Fondations (mandataire)**

**MESURES ET INSTRUMENTATION : Sites**

## ABSTRACT

### MICROPILE CONSOLIDATION WORK ON THE PIERS OF PONT D'ÏENA BRIDGE IN PARIS

LAURENT SAUSSAC, GEOS INGENIEURS CONSEILS - STÉPHANE CURTIL, GEOS INGENIEURS CONSEILS - AMBROISE DUFAYET, MAIRIE DE PARIS

**Due to extensive damage and subsidence detected on Pont d'Iéna bridge by Paris City Council workers, major consolidation work had to be done to stabilise the structure. For micropile underpinning of the piers most impacted by the subsidence, continuous monitoring of the bridge had to be established to ensure supervision of the bridge's behaviour during the works and adapt the execution procedures in real time during phases of subsidence acceleration or whenever acceptable thresholds were exceeded. Now anchored several metres deep in the steep layer of 'Marnes de Meudon' (marl), the bridge's new foundations will be able to stabilise the structure's subsidence, thus opening the way for masonry restoration and regeneration work. □**

### OBRAS DE REFUERZO POR MICROPILOTES DE LOS PILOTES DEL PUENTE DEL IENA, EN PARÍS

LAURENT SAUSSAC, GEOS INGENIEURS CONSEILS - STÉPHANE CURTIL, GEOS INGENIEURS CONSEILS - AMBROISE DUFAYET, MAIRIE DE PARIS

**Los desarreglos y desplomes importantes constatados en el puente del Iéna por los servicios del ayuntamiento de París han obligado a realizar importantes obras de refuerzo para estabilizar la construcción. El apuntalamiento por micropilotes de los pilotes más afectados por los asientos ha exigido una auscultación continua del puente para realizar un seguimiento del comportamiento de la construcción durante las obras y adaptar en tiempo real los procedimientos de ejecución durante las fases de aceleración de los asientos o de superación de los umbrales admisibles. Ancladas ahora varios metros dentro de la capa rígida de las margas de Meudon, los nuevos cimientos del puente permitirán estabilizar los asientos de la obra, abriendo así la vía a las obras de restauración y rehabilitación de la mampostería. □**



© SYSTRA

# EXTENSION DE LA LIGNE 1 DU MÉTRO DE LILLE

AUTEURS : AURÉLIE VIVIER, RESPONSABLE D'ÉTUDE OUVRAGES D'ART & STRUCTURES, SYSTRA - MARC CHOJNACKI, RESPONSABLE DES MARCHÉS TCE, SYSTRA - CHARLES HENRY DESCHAMPS, ADJOINT AU RESPONSABLE DES MARCHÉS TCE, SYSTRA - JULIEN TEXIER, INGÉNIEUR ÉTUDES, SYSTRA - HERVÉ LAPROYE, RESPONSABLE D'AFFAIRE, SYSTRA

LA LIGNE 1 DU MÉTRO DE LILLE A ÉTÉ INAUGURÉE EN 1983. TRENTE ANS PLUS TARD, IL A ÉTÉ DÉCIDÉ DE LA MODERNISER ET SURTOUT DE DOUBLER SA CAPACITÉ, EN ALLONGEANT LES RAMES DE 26 M À 52 M, EN RÉAMÉNAGEANT LES STATIONS, TOUT EN MAINTENANT LE TRAFIC. TROIS DIFFICULTÉS MAJEURES ONT FORTEMENT INFLUENCÉ LA CONCEPTION ET LES TRAVAUX : ÊTRE COMPATIBLE AVEC LA RÉSISTANCE DES STATIONS EXISTANTES, MAINTENIR EN PERMANENCE L'EXPLOITATION ET GÉRER LES NOMBREUSES INTERFACES.

## INTRODUCTION

Les 13,5 km de la ligne du métro relie Villeneuve-d'Ascq et le CHR de Lille (figure 2).

La ligne est essentiellement souterraine en tunnels et tranchées couvertes, avec les extrémités en viaducs et ouvrages au sol. Les 18 stations avaient été construites à 52 m mais

aménagées seulement sur 26 m. Afin d'augmenter la capacité de la ligne et d'anticiper sa saturation, l'extension à 52 m a été validée par la Communauté Urbaine de Lille en 2011.

Elle est accompagnée d'une révision du système de pilotage automatique et de la signalisation du métro ainsi que d'une modernisation et

**1- Création escalier suspendu du Station CHR Oscar Lambret.**

**1- Creation of hanging stairs, CHR-Oscar-Lambret Station.**

de la mise aux normes des stations. Les travaux de génie se sont déroulés de mi 2014 à fin 2016, Systra et Egis réalisant la maîtrise d'œuvre projet.

## EXTENSION À 52 M TRAVAUX PRÉVUS

Dans les stations, les travaux suivants ont été prévus :

## LIGNE 1 DU MÉTRO



© GOOGLE  
2

- Création de nouveaux accès :
  - Percements et ouvertures de trémies dans les dalles et voiles ;
  - Installation d'escaliers, escalators, ascenseurs entre les différents niveaux des stations ;
  - Création d'accès en surface (nouvelles structures).
- Aménagement des quais non aménagés.
- Mise aux normes ERP :
  - Incendie et sécurité ;
  - Accessibilité PMR ;
  - Reprise ou remplacement des escaliers existants.
- Mise en œuvre et remplacement des façades de quai (portes palières).
- Reprise de la ventilation - désenfumage.
- Désamiantage.
- Modernisation par du second œuvre.
- Impact du changement de matériel roulant et pilotage automatique (changement transformateurs, nouvelles armoires de pilotage automatique, courants forts etc.).
- Travaux de voies.

### EXIGENCES ET DIFFICULTÉS

La première exigence est le maintien du trafic du métro pendant toute la durée des travaux, impliquant :

- Maîtrise de la déformation du cadre du métro lors des travaux de soutènement.
- Sécurité et propreté des voies après travaux.
- Remise en route du pilotage automatique, électricité, etc., après les nuits de travaux.
- Horaires travaux en dehors des heures de fonctionnement du métro :

### 2- Ligne 1 du métro. 3- Nouvel accès extérieur station Porte-des-Postes.

### 2- Metro line 1. 3- New external entrance to Porte-des-Postes Station.

- Travaux en nuit courte (1h à 5h) : 4 heures de travail effectif ;
- Travaux en nuit longue (22h - 6h) : quelques nuits longues les week-ends pour certains travaux ne pouvant être faits en nuit courte.
- Choix de conception et phasage travaux adaptés pour assurer le maintien du trafic dans des plages de travail réduites.

La deuxième est le maintien de l'accès du public à toutes les stations :

- Maintenir l'accès aux différents niveaux des stations : phasage travaux avec fermeture alternée des différentes parties des stations.
- Travaux de jour ou de nuit selon le type de travaux et les zones.
- Sécurité : mise en place de cloisonnements et confinements.
- Signalisation.

Les nuisances doivent être aussi limitées pour les riverains vivant à proximité des stations (accès logements, parking, commerces, limitation des emprises chantier et des nuisances). La plupart des travaux intervenaient sur l'existant en stations, avec comme principales difficultés le peu de documentation de l'époque mais aussi de trouver des solutions de modification des stations compatibles avec leur résistance et les nouvelles exigences normatives. Enfin, la dernière difficulté a été de gérer les interfaces études, planification et ordonnancements des travaux et essais entre les différents corps de métier, en interfaces internes au marché ou en interfaces externes avec les marchés tiers.

### ZOOM SUR LES PRINCIPAUX TRAVAUX MARQUANT EN STATIONS

Avant de zoomer sur trois stations, une rapide description des travaux marquant dans les autres stations est faite ci-après :

- Station Caulier : création d'un couloir enterré en parois berlinoises.
- Station Hôtel-de-Ville et Lille-Flandres : travaux de rénovation intérieure avec désamiantage complexe dans ces stations très fortement fréquentées.
- Station Ocart-Lambret : création de nouveaux accès et installation d'escaliers suspendus. Une attention particulière a été apportée lors des études et des travaux à l'accrochage de ces escaliers sur la structure existante, à la redistribution des nouveaux efforts et à la non-fissuration de celle-ci lors de l'installation (figure 1).
- Station Portes-des-Postes : création d'un nouvel accès extérieur enterré en parois berlinoises (figure 3).
- Station Triolo : création de nouveaux accès PMR, avec ascenseurs, plateforme élévatrice, et escaliers.
- Autres stations : mise aux normes des escaliers (remplacement par des escaliers métalliques préfabriqués ou reprofilage des escaliers béton), créations de trémies, des locaux. ▷



3  
© SYSTRA

**ZOOM SUR TROIS STATIONS :  
IMPACT DES CONTRAINTES  
DE L'EXISTANT ET DU  
MAINTIEN EN EXPLOITATION  
SUR LE GÉNIE CIVIL**

**GAMBETTA**

La station Gambetta est une station enterrée et forme un cadre sur 4 niveaux : dalle de couverture, salle des billets, quai et radier.

**Solution du PRO**

Outre les travaux courants en station, il s'agit de créer un accès depuis la salle des billets jusqu'à l'extérieur :

- Création d'un escalier en béton armé, nécessitant la réalisation d'une trémie dans la dalle de couverture.
- Réalisation d'une couverture au droit de l'escalier permettant de l'isoler du remblai.

Compte tenu de la redistribution des charges sur la dalle par la création des ouvertures, un sarcophage avait été prévu pour alléger les charges sur la dalle.

Ces renforts étaient constitués de quatre nervures couvertes par une dalle de toiture portant les charges de terre réduites. Une grande nervure était également réalisée en about de station, qui sert de soutènement en phase de construction et permet la conservation de la circulation des camions de livraison.

Afin de garantir une continuité de service pour les usagers, le métro et les riverains :

- Circulation des camions de livraison conservée grâce à la nervure transversale.
- Circulation piétonne maintenue grâce aux nervures longitudinales.
- Circulation routière alternée de la rue maintenue grâce aux nervures longitudinales.
- Impact limité en station car la plupart des travaux se fait en surface grâce au sarcophage, sans impact sur la circulation du métro et réduite sur les quais.

**Solution de l'Exécution**

Un aménagement de l'ouverture de la verrière est finalement réalisé à la place de la trémie pour permettre l'installation des nouveaux escaliers. Cela consiste en une dépose de la verrière, puis en la création d'un palier support des escaliers et une couverture de l'escalier. Deux voiles seront également créés pour retenir les terres de part et d'autre du nouvel escalier béton.

Le changement de conception a été décidé pour :

- Orienter la sortie niveau voirie vers les commerces.

- Maintenir la circulation sur la rue très fréquentée.
- Pallier l'incertitude sur la faisabilité de la solution sarcophage du fait de sondages sur le ferrailage de la dalle peu fiable.
- Simplification des travaux : zone d'impact en station et en surface réduite, temps de travaux réduits, suppression d'interface avec les ouvrages de ventilation pour obtenir une limitation de l'impact sur les usagers et assurance de la continuité de service (figure 4).

**Travaux**

Les travaux ont débuté avec la dépose de la verrière, soumise à des impératifs de confinement en raison du désamiantage des joints de menuiserie. Malgré une première phase de dévoisement de réseaux, l'entreprise a découvert, par deux fois, de nouveaux réseaux.

Les concessionnaires sont alors intervenus dans des délais qui ont fortement impactés le planning.

Le réseau d'assainissement a pu être contourné en adaptant le profil des volées d'escalier.

Les travaux se sont poursuivis avec le sciage par blocs de la dalle couverture, qui a permis l'introduction des éléments volumineux de l'escalier métallique.

Les parois de l'accès ont alors rapidement pu être coulées.

Les travaux d'étanchéité, toujours délicats à mener lors d'un raccord à l'existant, ont nécessité un système adapté garantissant la pérennité de l'ouvrage.

À l'intérieur de la station, la mise en œuvre de la charpente de l'escalier mécanique s'est faite dans l'emprise libérée des tours d'étalement ayant servi au percement de la dalle (figure 5).

**4- Station Gambetta, solution du PRO et de l'exécution.**

**4- Gambetta Station, project engineering and execution solution.**

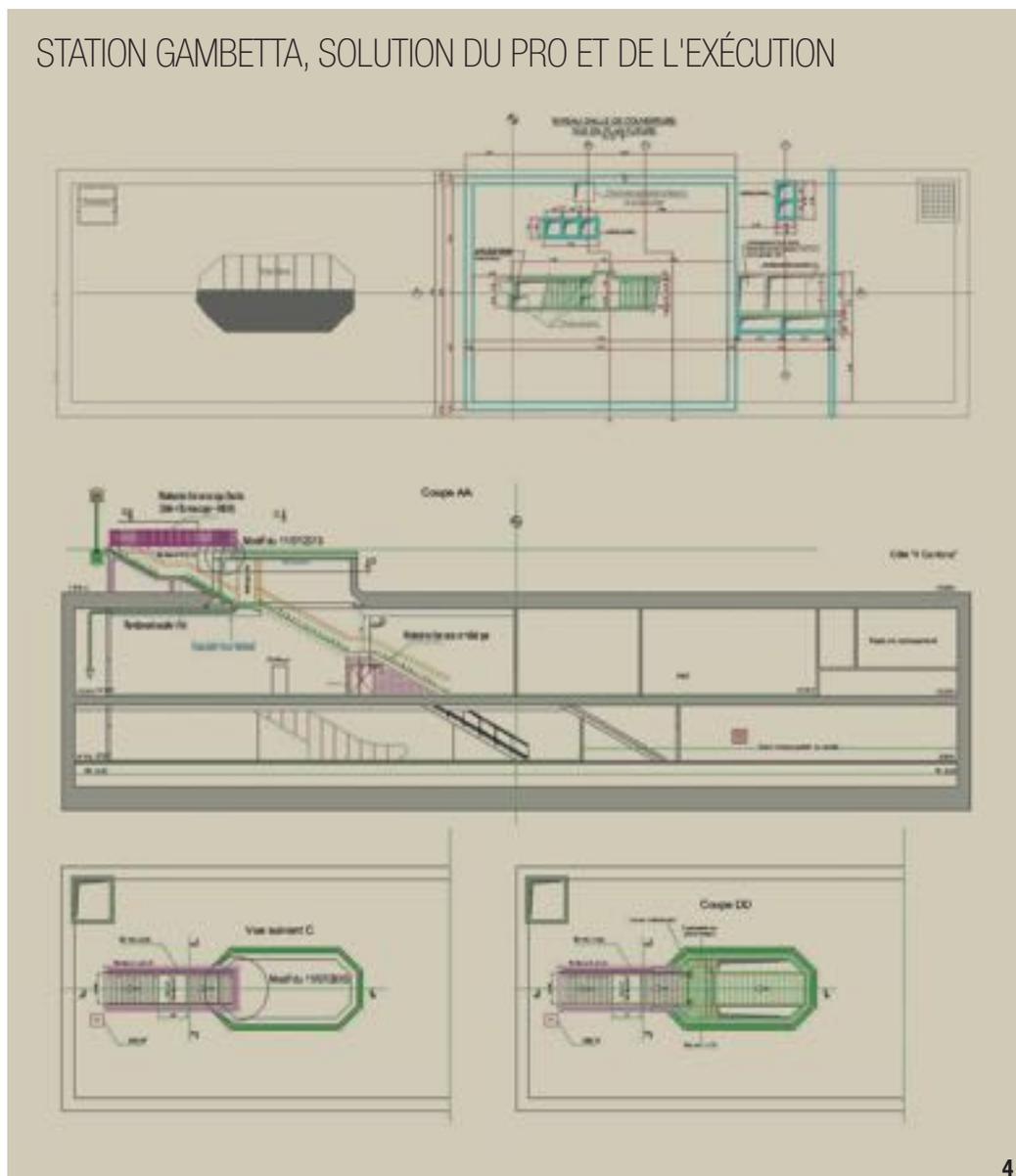
**LEZENNES**

La station Lezennes est une station enterrée et forme un cadre sur 3 niveaux : dalle de couverture, quais et radier.

**Solution du PRO**

Outre les travaux courants en stations, il s'agit de créer un accès depuis les quais jusqu'à l'extérieur :

STATION GAMBETTA, SOLUTION DU PRO ET DE L'EXÉCUTION



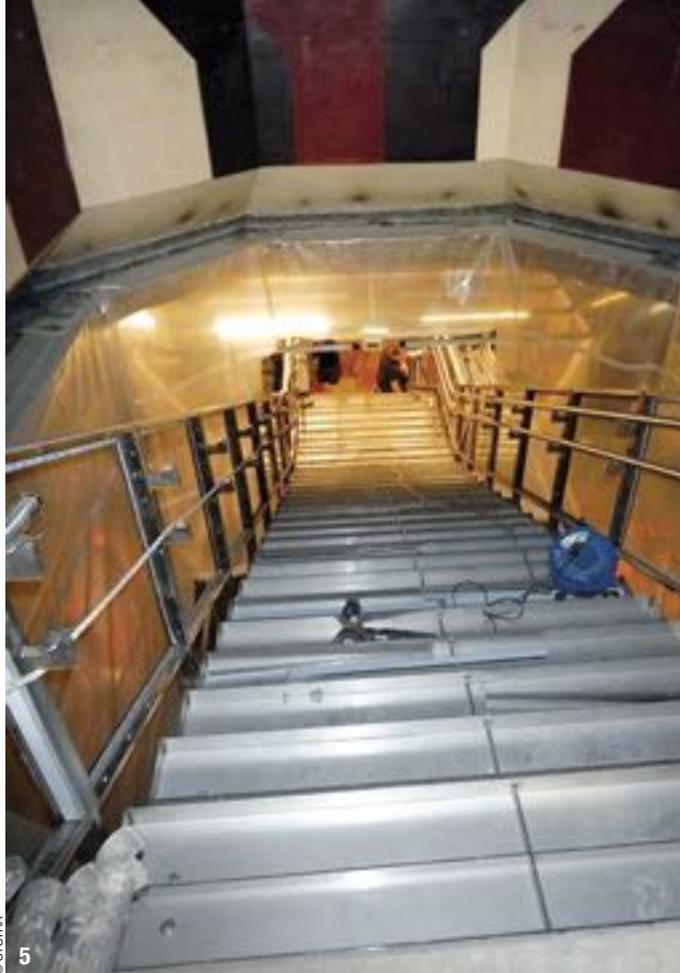
- Création de deux escaliers en béton armé nécessitant la réalisation de trémies dans la dalle de couverture.
- Réalisation d'une couverture ponctuelle au droit des escaliers permettant de l'isoler du remblai.

5- Mise en œuvre de l'escalier métallique dans la verrière.

6- Station Lezennes, solution du PRO et de l'exécution.

5- Execution of the metal stairway in the glazed area.

6- Lezennes Station, project engineering and execution solution.



© SYSTRA

5

Compte tenu des charges redistribuées sur la dalle par la création des ouvertures, des renforts structuraux sont à disposer sur le pourtour de l'ouverture de manière à conserver le fonctionnement en dalle avec, comme direction principale, la direction transversale.

Ces renforts sont constitués de deux nervures longitudinales prolongées de plus de 3 m de part et d'autre des ouvertures.

Les voiles des escaliers sont également réalisés en béton armé afin de rigidifier les nervures.

De plus, la dalle de couverture de l'escalier participe à la rigidification de l'ensemble.

Afin de garantir une continuité de service pour les usagers, le métro et les riverains :

→ Circulation piétonne et routière réduite mais conservée.

→ Étalement de la dalle, avec les problèmes d'emprise sur quai et de phasage des circulations piétons.

#### Solution de l'exécution

Les renforts sont finalement constitués de deux poutres métalliques longitudinales et de quatre poutres métalliques transversales portant la dalle de couverture et reposant sur 8 poteaux en béton armé.

Un vérinage de la dalle est prévu afin de transférer les efforts de la dalle avant travaux sur les poutres et poteaux additionnels.

Le changement de conception a été décidé car les sondages sur les ferrillages de la dalle réalisés avant les phases EXE ont confirmé des sections d'aciers insuffisantes (ces sondages nécessitaient la coupure de la circulation qui était non réalisable au moment des études). La solution initiale n'était pas viable.

La continuité de service est assurée par l'emprise réduite tant dans la station qu'en surface, et une réduction du temps de travaux (moins de terrassement, coupures accès quais réduit) (figure 6).

#### Travaux

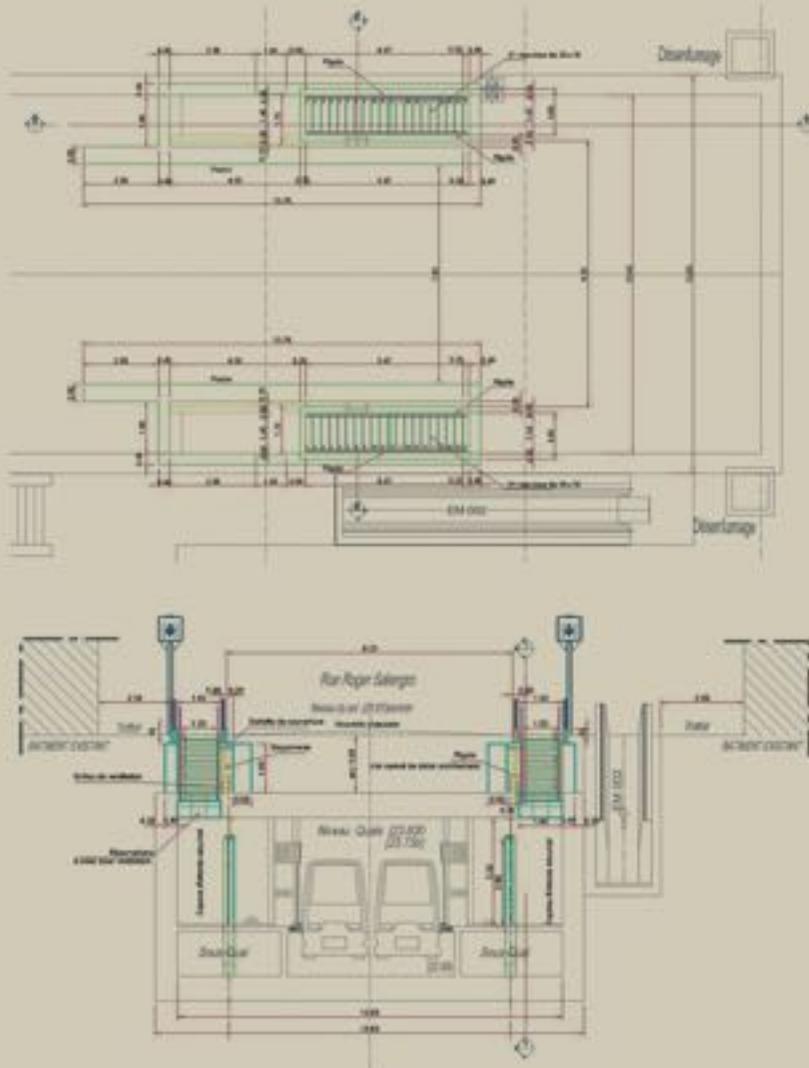
Les déviements de réseaux ont pris plus de deux ans, retardant fortement le démarrage du chantier.

De plus, plusieurs autres réseaux ont été découverts lors des terrassements, retardant encore certaines phases.

Les travaux ont débuté au niveau des quais et des sous-quais avec la création des poteaux en béton armé.

Une fois les poteaux coulés et les vérins installés, les poutres métalliques, acheminées de nuit par train travaux, ont été installées.

## STATION LEZENNES, SOLUTION DU PRO ET DE L'EXÉCUTION



© SYSTRA

6

7- Éléments métalliques acheminés par train travaux et puis installés.

8- Pose des poutres métalliques et sciage de la dalle.

9- Réalisation des nervures.

10- Station Pont-de-Bois, solution du PRO et de l'exécution.

7- Steel members transported by work train and then installed.

8- Placing steel beams and sawing the slab.

9- Execution of ribs.

10- Pont-de-Bois Station, project engineering and execution solution.



© SYSTRA

Puis, l'installation des étaitements a permis le sciage de la dalle de couverture. Les blocs de béton sciés ont été maintenus en place pour permettre une main d'œuvre aisée pour la réalisation des nervures en surface.

La reprise d'étanchéité sur la membrane existante a été délicate et a nécessité un soin particulier.

La mise en place du ferrailage et les opérations de bétonnage ont donné forme aux nouveaux accès, les blocs sciés ont été dégagés afin d'entamer les aménagements de second œuvre (figures 7, 8 et 9).

### PONT-DE-BOIS

La station Pont-de-Bois est une station semi-enterrée sur 3 niveaux : salle des billets, quais et radier.

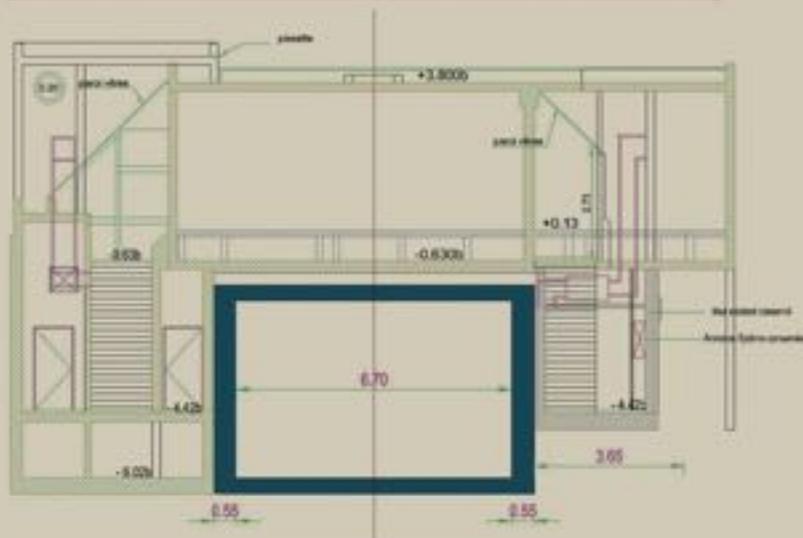
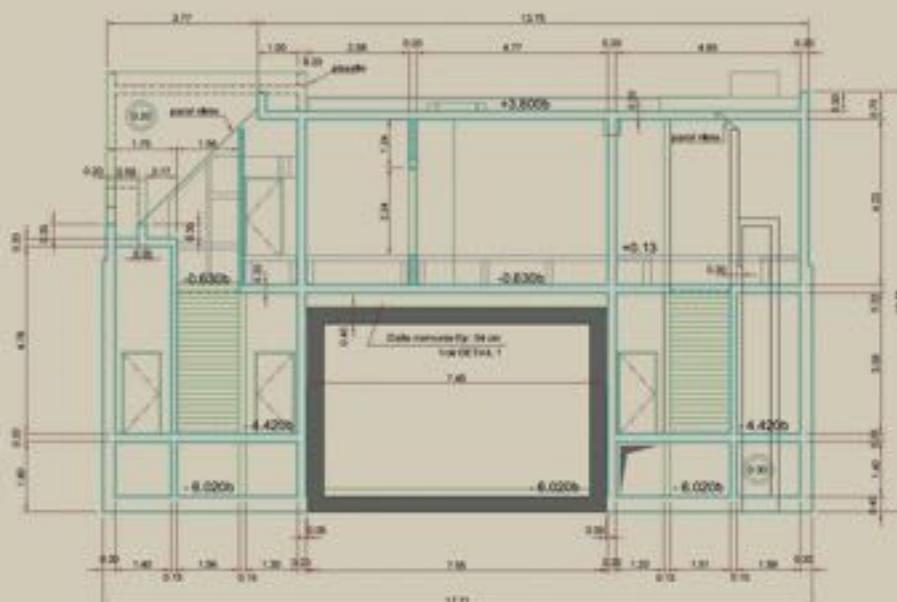
#### Contraintes sur l'exécution

La première contrainte majeure sur cette station est de protéger le caisson dans lequel le train circule.

Deux voiles porteurs, recouverts par une dalle, sont donc construits de chaque côté du cadre, afin de l'isoler. La maîtrise des mouvements du cadre a été assurée par un terrassement par passes successives de chaque côté afin de rester symétrique sur la hauteur des terres en phase de construction.

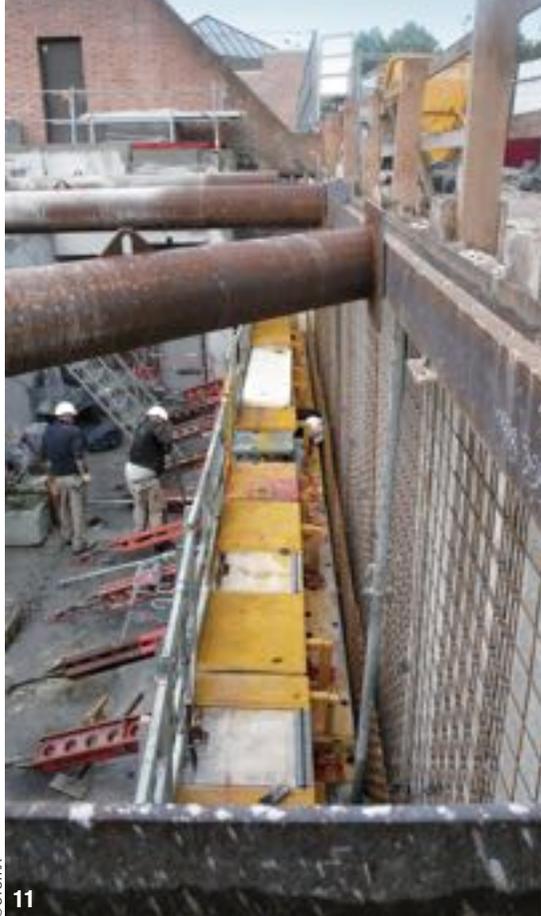
Une instrumentation a été mise en place pour suivre les mouvements.

## STATION PONT-DE-BOIS, SOLUTION DU PRO ET DE L'EXÉCUTION



10

© SYSTRA



© SYSTRA  
11



12

La deuxième contrainte est la proximité des voies SNCF, pour lesquelles des vérifications ont été faites en amont pour vérifier la stabilité du talus. Les tassements pendant les travaux sont suivis.

**Changement de solution entre le PRO et l'exécution dû à la présence d'une armoire de pilotage automatique**

La présence d'une armoire de pilotage automatique du métro sur un des murs de la station, non migrable du fait de la vétusté du câblage et des risques sur l'exploitation, a conduit à un changement de géométrie d'une partie de la structure nouvelle pour conserver le mur existant de support des armoires, tout en l'isolant de la structure nouvelle (figure 10).

**Travaux**

La continuité de fonctionnement des armoires de pilotage a également nécessité la mise en œuvre d'un encoffrement métallique « lourd » et

**11- Ferrailage des voiles, butonnage et liernes.**

**12- Élévation niveau n, mise en place des éléments préfabriqués.**

**11- Reinforcement of shear walls, staying and lierne ribs.**

**12- Elevation view of level n, installing prefabricated members.**

étanche durant les travaux, pour résister à d'éventuelles chutes des blocs ou d'éboulement.

Par la suite, les anciens ouvrages d'accès ont été démolis permettant l'installation des parois préfabriquées.

Pour contrôler les mouvements du cadre et des talus SNCF, la pose des liernes et des butons s'est donc déroulée à l'avancement et dans un périmètre restreint. Le radier a ensuite été coulé (figure 11).

Par la suite, l'assemblage en éléments préfabriqués des différents niveaux a permis un gain de temps appréciable, mais a complexifié les manipulations aux abords de la voie SNCF (figure 12). □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Métropole Européenne de Lille

**EXPLOITANT DU MÉTRO :** Transpole

**MAÎTRISE D'ŒUVRE ET VISA :**

Systra (génie civil) et Egis (matériel roulant)

**ENTREPRISES DE GÉNIE CIVIL :**

Spie Batignolles, Bouygues Bâtiment Nord-Est, Demathieu Bard

**ENTREPRISE DE MATÉRIEL ROULANT ET AUTOMATISATION :**

Alstom

**ENTREPRISE DE COURANT FORT :** Ineo Suez

**BUREAU DE CONTRÔLE :** Veritas

**ARCHITECTE :** Jean Pannel

ABSTRACT

**EXTENSION OF LILLE METRO LINE 1**

AURÉLIE VIVIER, SYSTRA - MARC CHOJNACKI, SYSTRA - CHARLES HENRY DESCHAMPS, SYSTRA - JULIEN TEXIER, SYSTRA - HERVÉ LAPROYE, SYSTRA

The length of the train sets on line 1 of the Lille metro has been extended from 26 to 52 metres. This involved renovation of the existing stations over an extra 26 metres, but also their modernisation and retrofitting, with the creation of new entrances, replacement of the existing stairways, the development of PRM rooms (for persons with reduced mobility), and in particular the platforms. Three major difficulties greatly influenced the design and construction work: compatibility with the resistance of existing stations, maintaining operation constantly and managing the numerous interfaces. This led to design changes during the works to adapt to the resistance constraints of the existing stations, metro operation and continuing traffic above ground. □

**AMPLIACIÓN DE LA LÍNEA 1 DEL METRO DE LILLE**

AURÉLIE VIVIER, SYSTRA - MARC CHOJNACKI, SYSTRA - CHARLES HENRY DESCHAMPS, SYSTRA - JULIEN TEXIER, SYSTRA - HERVÉ LAPROYE, SYSTRA

La ampliación hasta una longitud de 52 m de la línea 1 del metro de Lille ha requerido la rehabilitación de las estaciones existentes en los 26 m no rehabilitados, pero también su modernización y su adaptación a las normas, con la creación de nuevos accesos, la sustitución de las escaleras existentes, la habilitación de locales para PMR (Personas con Movilidad Reducida) y, sobre todo, la construcción de los andenes. El diseño y las obras han estado condicionadas por tres grandes obstáculos: ser compatibles con la resistencia de las estaciones existentes, mantener la operativa del metro en todo momento y gestionar las numerosas interrelaciones. Ello ha exigido modificaciones en el diseño durante la ejecución para adaptarse a los límites de resistencia de la construcción existente, a la operativa del metro o al respeto de la circulación en superficie. □



1

© PHOTOTHÈQUE CHANTIERS BYTPRF

# LE RENFORCEMENT DU PONT PATTON À ÉVRY

AUTEURS : SAMY AMMAR, RESPONSABLE TRAVAUX, BOUYGUES TP RÉGIONS FRANCE - CYRIL COTTEY, DIRECTEUR ADJOINT SERVICE OUVRAGE D'ART, BUREAU D'ÉTUDES COGECI - VIRGINIE GAIGNIER, CHEF DE PROJET SERVICE OUVRAGE D'ART, BUREAU D'ÉTUDES COGECI

**CONSTRUIT AU DÉBUT DES ANNÉES 1970, LE PONT PATTON SUR LA SEINE, ENTRE ÉVRY ET ÉTIOLLES, SUPPORTE UN TRAFIC ROUTIER QUOTIDIEN DENSE. LES PATHOLOGIES ACTUELLES RÉVÈLENT LES INSUFFISANCES DE CONCEPTION DE CE TYPE D'OUVRAGE POUR CETTE ÉPOQUE. LES ÉTUDES ET LES TRAVAUX DE RENFORCEMENTS DÉCRITS DANS CET ARTICLE ONT PERMIS À L'OUVRAGE DE RETROUVER SA FONCTIONNALITÉ. LA VOLONTÉ DE RÉDUIRE AU MAXIMUM LA GÊNE OCCASIONNÉE PAR LES TRAVAUX AUX USAGERS ET LES DIMENSIONS DE L'OUVRAGE ONT IMPOSÉ LE RECOURS À DES MODES OPÉRATOIRES ET À DES ACCÈS SPÉCIFIQUES**

## L'OUVRAGE

Il s'agit d'un ouvrage de type monocaïson en béton précontraint construit par encorbellements successifs. Il comporte 3 travées de 56,65 - 95,68 - 56,65 m de longueur. Les fléaux sont constitués de voussoirs préfabriqués de 2,08 m ou 3,12 m de longueur. Il est à noter que les âmes d'une partie des voussoirs de

la travée centrale sont précontraintes verticalement. Il n'y a pas de précontrainte transversale dans le hourdis supérieur. La hauteur du tablier varie de façon parabolique de 2,00 à la clé à 5,00 m sur pile. La largeur totale du tablier est de 14,10 m. Les culées sont constituées d'un sommier posé sur deux semelles reposant chacune sur

**1- Vue générale  
du pont Patton.**

**1- General view  
of Patton Bridge.**

un groupe de 5 poteaux de diamètre 600 mm fondés sur palpieux. Les piles, en Seine, sont constituées d'un fût rectangulaire reposant sur une semelle massive fondée sur 24 pieux BA de 500 mm de diamètre. L'ouvrage a été construit en 1973. Le câblage du tablier est donc entièrement composé de câbles intérieurs au béton (figure 1).

2- Vue en élévation du modèle : barres modélisant le caisson et câbles de précontrainte.

3- Vue en plan élargie du modèle : barres modélisant le caisson et câbles de précontrainte.

4- Résultats ST1 en  $t/m^2$  - diagrammes de contraintes normales - état de l'ouvrage avant réparation.

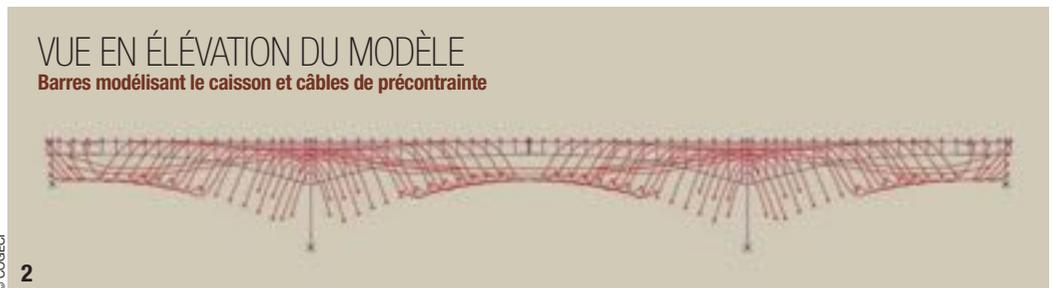
5- Résultats ST1 en  $t/m^2$  - diagrammes de contraintes normales - état de l'ouvrage après réparation.

2- Elevation view of the model: bars modelling the caisson and prestressing cables.

3- Enlarged plan view of the model: bars modelling the caisson and prestressing cables.

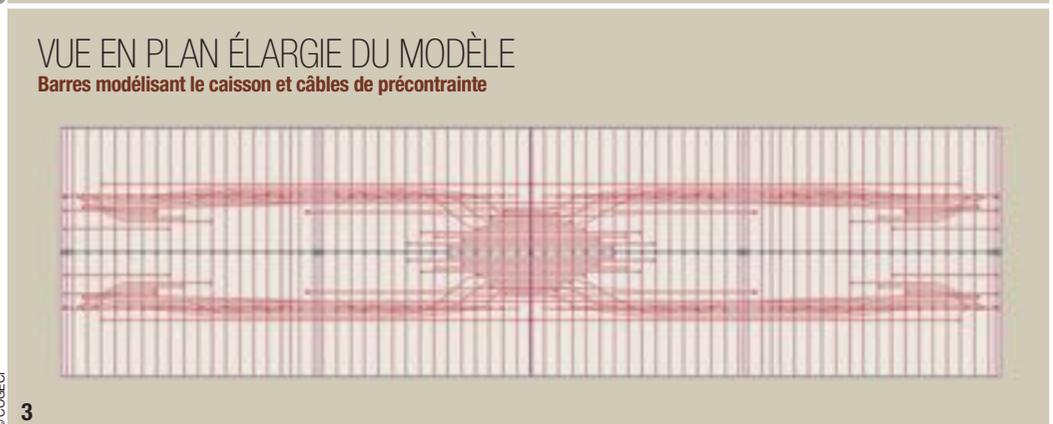
4- ST1 results in  $t/m^2$  - normal stress diagrams - state of the bridge before repairs.

5- ST1 results in  $t/m^2$  - normal stress diagrams - state of the bridge after repairs.



© COGECI

© COGECI



### LA NÉCESSITÉ DE RÉALISER DES TRAVAUX

Plusieurs campagnes d'investigations ont été menées et ont mis en évidence certaines pathologies et désordres sur le tablier :

→ Nombreuses fissures d'entraînement-diffusion en « arêtes de poisson » présentes dans le hourdis inférieur près des ancrages des câbles de continuité et remontant pour certaines jusque dans les âmes.

→ Fissures longitudinales dans le hourdis inférieur dues à la poussée au vide de ces mêmes câbles de continuité.

Les désordres de ces 2 premiers points sont caractéristiques de la conception des ouvrages de cette époque qui ne prévoyait que des câbles intérieurs au béton et qui aboutissait à une forte densité de câbles de continuité avec un dimensionnement des aciers de reprise des efforts locaux mal

adapté. L'ouverture de ces fissures peut aller localement jusqu'à 0,6 mm.

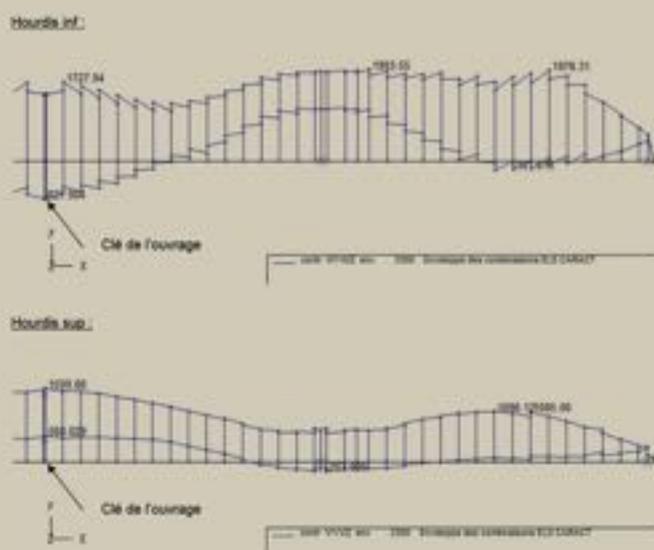
→ Une flèche marquée en milieu de travée centrale traduisant la non prise en compte du phénomène de fluage du béton dans la conception de l'ouvrage.

L'analyse de ces désordres a ainsi conduit à procéder à divers renforcements de la structure :

→ Renforcement à la flexion générale par précontrainte additionnelle ; ▷

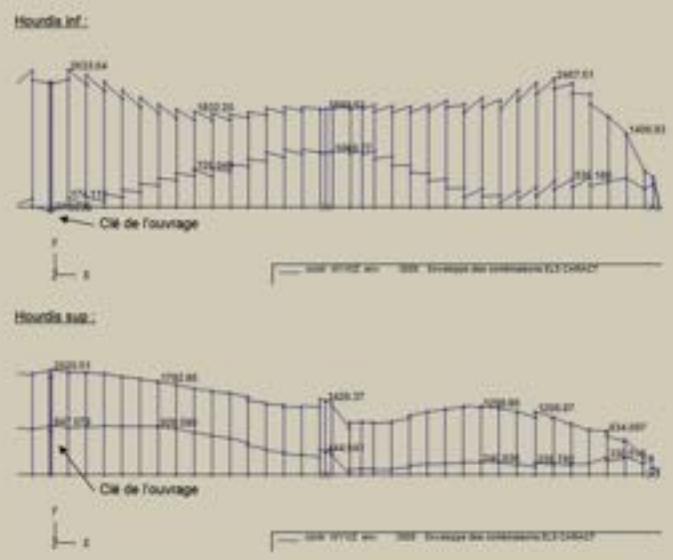
## RÉSULTATS ST1 EN $t/m^2$ - DIAGRAMMES DE CONTRAINTES NORMALES

État de l'ouvrage avant réparation

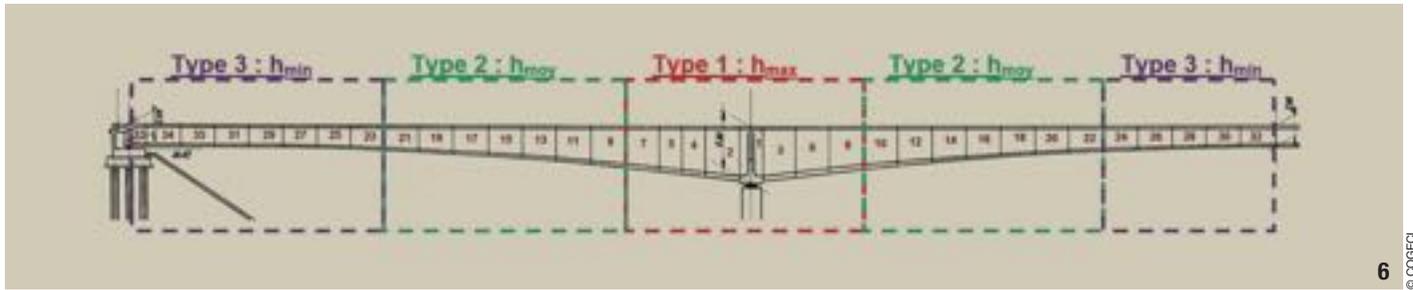


© COGECI

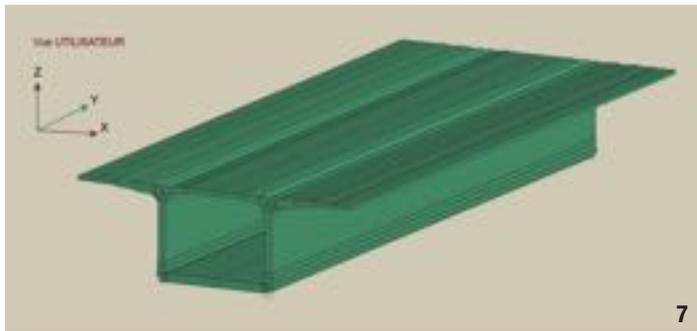
État de l'ouvrage après réparation



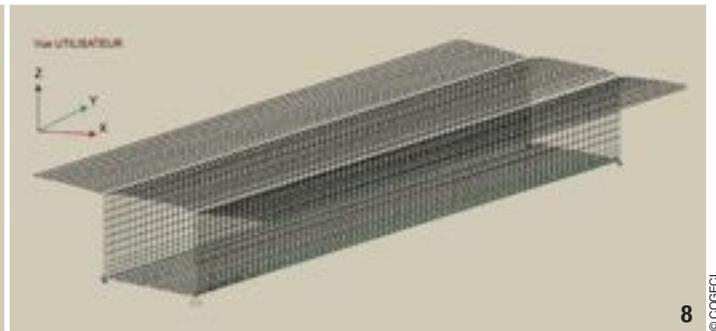
© COGECI



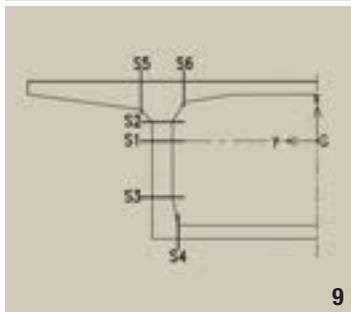
6



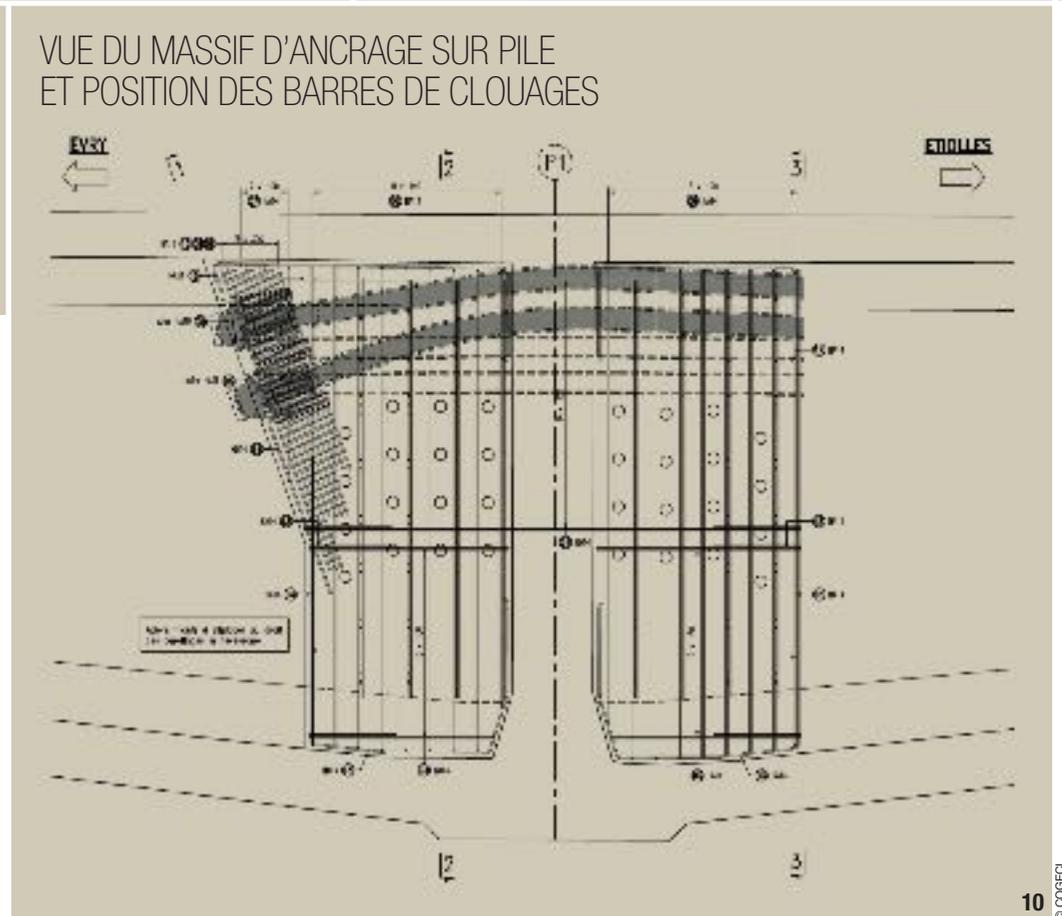
7



8



9



10

6- Vue en élévation du demi-ouvrage avec type de voussoir et hauteur considérés dans les modèles.

7- Vue globale du modèle avec hauteur maximale.

8- Vue du maillage du modèle.

9- Coupes de calculs du caisson.

10- Vue du massif d'ancrage sur pile et position des barres de clouage.

6- Elevation view of the half-structure with type of segment and height considered in the models.

7- Overall view of the model with maximum height.

8- View of model meshing.

9- Caisson computation sections.

10- View of the anchoring foundation on pier and position of stitching bars.

- Renforcement au tranchant par fibres de carbone ;
- Renforcement du hourdis inférieur par précontrainte additionnelle par barres.

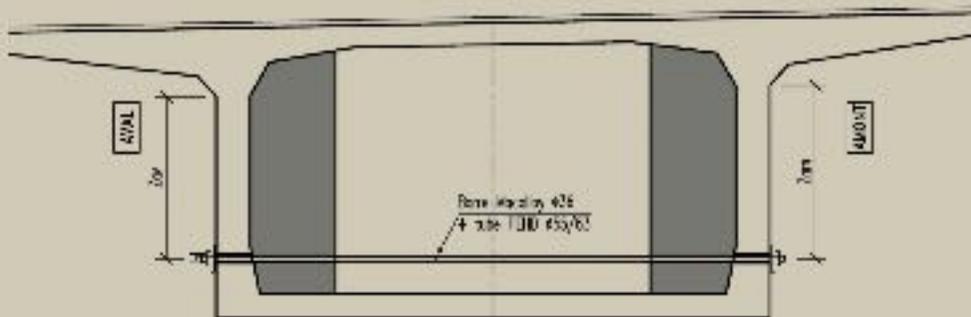
### LES ÉTUDES D'EXÉCUTION LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

Les études d'exécution du renforcement du pont d'Évry ont été réalisées avec les hypothèses suivantes :

- Règlement de calcul appliqué : règles Eurocodes.
- Charges considérées pour le recalcul de la flexion longitudinale de l'ouvrage :
  - Eurocodes 1 Partie 2 : Actions sur les ponts, dues au trafic : NF EN 1991-2.
  - Fascicule 61 titre II (système de charges civiles A1, Bc, et charges de trottoir associées) par application

- de la note d'information du Setra n°35 de mai 2012 « Méthodes courantes d'évaluation structurale des ouvrages existants » pour comparaison avec Eurocodes.
- Étude de clouage des massifs d'ancrage de la précontrainte additionnelle : norme NFP 95-104.
- Étude de diffusion : guide du Setra « Diffusion des efforts concentrés » de novembre 2006.

## COUPE SUR BARRE DE PRÉCONTRAINTE DU HOURDIS AVEC RAIDISSEUR



© COGECI

11

→ Étude des renforcements carbone : Recommandations provisoires de l'Afgc « Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites » de février 2011.

### ÉTUDE DE FLEXION LONGITUDINALE

L'étude de flexion longitudinale a été réalisée sous le logiciel ST1 du Setra à l'aide d'une modélisation filaire du caisson béton. Chaque barre du modèle représente un voussoir de l'ouvrage. Les barres sont excentrées de la valeur du centre de gravité du caisson. Les points d'appuis de l'ouvrage sont excentrés de la hauteur du caisson. L'ensemble de la précontrainte (câblage existant et câblage additionnel) a été entré dans la modélisation avec excentrement vertical et horizontal afin d'esti-

**11- Coupe sur barre de précontrainte du hourdis avec raidisseur.**  
**12- Élévation des renforcements en fibre de carbone par face.**

**11- Cross section on top slab prestressing bar with stiffener.**

**12- Elevation view of carbon-fibre reinforcements on each side.**

mer les pertes réelles de précontrainte. Les effets différés du béton (retrait, fluage) et de la précontrainte (pertes par relaxation) ont été intégrés dans les calculs (calcul de fluage scientifique) (figures 2 et 3).

Ceci permet une bonne corrélation entre la flèche théorique de l'ouvrage obtenue par la modélisation ST1 et la flèche réelle déduite des relevés du profil en long de l'ouvrage. Dans l'étude de l'ouvrage, ce modèle a permis de connaître les contraintes normales et les contraintes de cisaillement dans le caisson durant les différentes phases de la vie de l'ouvrage (état actuel avant réparation, état après réparation, état à 100 ans à  $t = 36500$  jours). Les contraintes normales dans les poutres à l'ELS ont été comparées aux valeurs limites réglementaires. Les contraintes de cisaillement dans les poutres à l'ELS ont été utilisées pour établir la vérification de la non-fissuration des âmes selon les principes de vérification de l'annexe QQ de l'EN 1992-2 (figures 4 et 5).

Ces vérifications ont conduit à justifier la précontrainte additionnelle extérieure suivante :

- 2 paires de câbles 19T15S par caisson filant d'une culée à l'autre ;
- 2 paires de câbles 27T15S par caisson filant d'une pile à l'autre, plus courts.

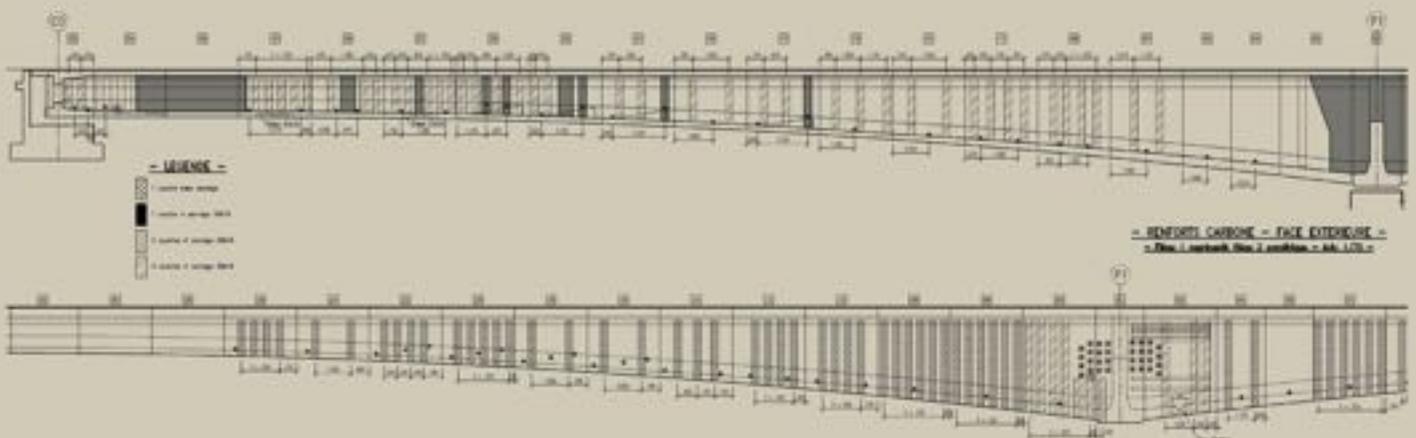
### ÉTUDE DE FLEXION TRANSVERSALE

Une modélisation en éléments finis surfaciques a été réalisée sous le logiciel Advance pour l'étude de flexion transversale des voussoirs de l'ouvrage. Trois modèles ont été réalisés selon les hauteurs de voussoir (figure 6) :

- Hauteur maximale : hauteur maximale des voussoirs de la zone sur pile ;
- Hauteur minimale : hauteur minimale des voussoirs de la zone sur culée ;
- Hauteur moyenne : hauteur moyenne des voussoirs des voussoirs situés dans les zones intermédiaires aux zones précitées.

L'étude se limite à la modélisation d'une longueur du caisson fixée ici à 4 voussoirs soit 12,48 m. Le caisson est discrétisé en plusieurs éléments surfaciques dont leur épaisseur est une épaisseur moyenne (figures 7 et 8). Ce modèle a permis de déterminer les moments de flexion transversale ainsi et que les efforts tranchants transitant dans le caisson. Ces sollicitations ont permis de déterminer les sections d'armatures nécessaires dans les différentes parties du caisson (hourdis inférieur, âmes, hourdis supérieur) (figure 9). ▷

## ÉLÉVATION DES RENFORCEMENTS EN FIBRE DE CARBONE PAR FACE



12

© COGECI

**13- Vue zoomée d'une partie 3D de l'ouvrage avec précontrainte additionnelle.**

**14- Vue d'une partie 3D de l'ouvrage avec réseaux existants et massifs d'ancrage existants.**

**13- Close-up view of a 3D part of the bridge with additional prestressing.**

**14- View of a 3D part of the bridge with existing lattices and anchoring foundations.**

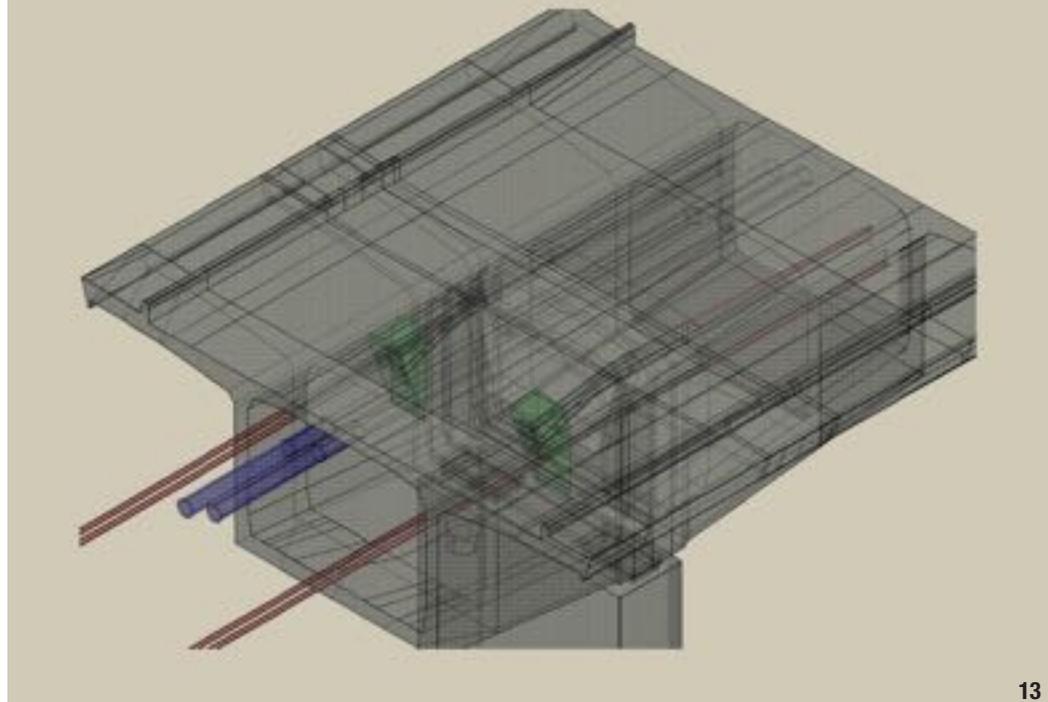
Ce modèle a également permis de justifier le ferrailage des raidisseurs ajoutés dans certains voussoirs pour équilibrer les efforts de flexion engendrés par la mise en place d'une barre de précontrainte dans le hourdis. Les raidisseurs étaient alors modélisés par des éléments filaires superposés à l'âme du caisson (élément surfacique). Enfin, le modèle a été utilisé pour déterminer l'efficacité de la précontrainte dans le hourdis inférieur en vérifiant l'intensité de la force de précontrainte transitant réellement dans le hourdis selon la position verticale de la barre de précontrainte sur le voussoir.

#### LES DISPOSITIONS DE RENFORCEMENT ET CALCULS ASSOCIÉS

Au final, les études d'exécution ont abouti sur la nécessité de réaliser les renforcements suivants :

- Ajout de précontrainte additionnelle, des massifs d'ancrage et des déviateurs de cette précontrainte pour obtenir des contraintes normales du caisson admissibles ;
- Ajout de barres de précontrainte dans le hourdis inférieur pour renforcer le hourdis sous vérification diffusion/tranchant/flexion ;
- Ajout de bandes carbone intérieures et extérieures aux caissons pour renforcer les âmes sous vérification diffusion/tranchant/flexion ;
- Ajout de raidisseurs dans les âmes lorsque les barres de précontrainte du hourdis inférieur ne pouvaient pas être disposées au plus proche de celui-ci (du fait de la présence des massifs d'ancrage des câbles existants notamment).

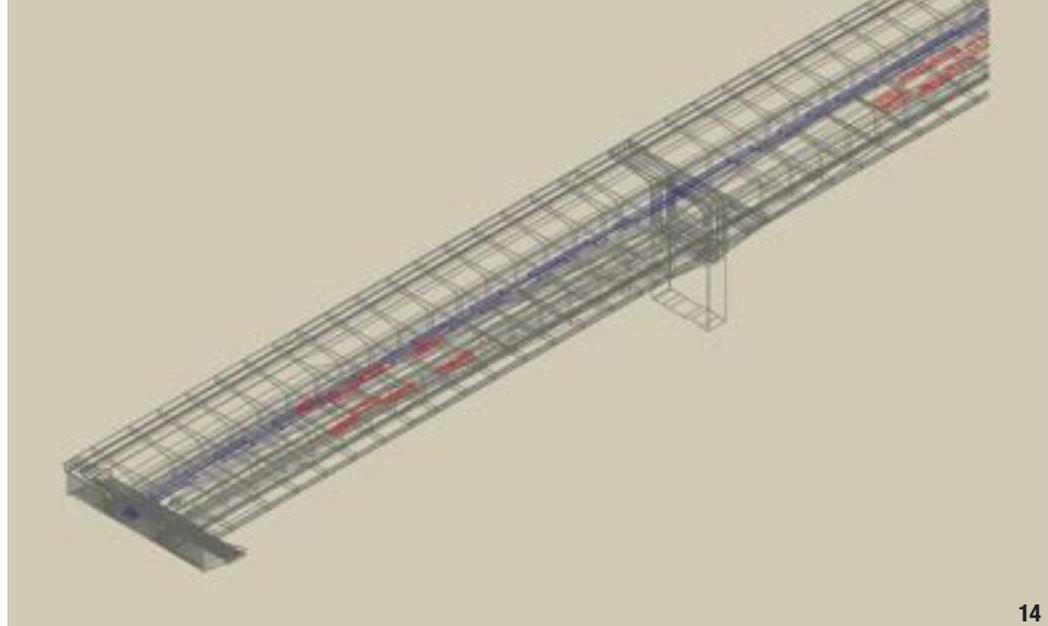
VUE ZOOMÉE D'UNE PARTIE 3D DE L'OUVRAGE AVEC PRÉCONTRAINTE ADDITIONNELLE



13

© COGECI

VUE D'UNE PARTIE 3D DE L'OUVRAGE AVEC RÉSEAUX EXISTANTS ET MASSIFS D'ANCRAGE EXISTANTS



14

© COGECI

#### Massifs d'ancrage, déviateurs et raidisseurs

Les études de clouage des massifs d'ancrage de la précontrainte additionnelle (et massifs déviateurs) ont été menées suivant la norme NFP 95-104. L'accroche des massifs a été justifiée à l'aide de barres précontraintes de clouage complétées par des scelllements d'aciers

passifs selon l'article paru dans le n°501 des annales de l'ltbtp de février 1992.

Un dimensionnement mixte (béton précontraint - béton armé) a donc été retenu (figure 10) :

- Sous sollicitations ELS, l'accroche du massif a été justifiée au sens de la norme NFP 95-104 par la seule précontrainte ;

- Sous sollicitations ELU, l'accroche du massif a été justifiée selon le n°501 des annales de l'ltbtp par la précontrainte associée à des armatures passives scellées.

#### Renforcement du hourdis inférieur par barre de précontrainte

Des barres de précontrainte ont été mises en œuvre dans le hourdis inférieur lorsque le calcul des armatures



© PHOTOTHÈQUE CHANTIERS BYTPRF

© PHOTOTHÈQUE CHANTIERS BYTPRF

nécessaires sous cumul de diffusion, tranchant et armatures de flexion montrait une insuffisance au niveau du hourdis.

L'étude des renforcements par barre précontrainte a été conduite par une approche en contrainte de cisaillement dans la paroi. Le dimensionnement du nombre de barres nécessaire a été réalisé pour chaque voussoir et pour deux sections du hourdis (soit 2 fois 35 sections), permettant ainsi d'optimiser grandement les travaux de renforcement. Cette analyse fine a ainsi pu être mise en œuvre grâce à l'utilisation d'un outil de calcul spécifiquement développé par Cogeci pour cette affaire (figure 11).

**15- Massifs d'ancrage sur piles et câbles de précontrainte longitudinale.**

**16- Application de renforcement carbone.**

**17- Application du revêtement.**

**15- Anchoring foundations on piers and longitudinal prestressing cables.**

**16- Application of carbon reinforcement.**

**17- Application of surfacing.**

La position des barres précontraintes, qui doit tenir compte de la présence des câbles existants, a un impact direct sur la flexion transversale des âmes. Cet impact a été intégré dans les calculs.

**Les études de renforcement en tissu de fibres de carbone**

Des renforcements en tissu de fibres de carbone ont été mis en œuvre sur les âmes du caisson dans les zones où les âmes n'étaient pas déjà renforcées par la présence de déviateurs ou raidisseurs et où les armatures existantes s'avéraient insuffisantes. L'étude des renforcements en tissu de fibres carbone a été conduite selon les recommandations provisoires du guide Afgc

de février 2011. Le dimensionnement des bandes a été réalisé pour chaque voussoir et pour 3 sections de l'âme (soit 3 fois 35 sections), et pour chaque face (figure 12).

**IMPORTANCE DU DESSIN**

Le chantier de réparation du pont d'Évry présente la particularité d'associer différents types de renforcement mis en œuvre dans un environnement confiné, rendant les travaux très complexes à réaliser :

- Câble existant au droit des massifs d'ancrage ;
- Massifs d'ancrage existants sur le passage prévu des barres de précontraintes du hourdis ;

**18- Précontrainte du hourdis inférieur.**

**19- Précontrainte du hourdis inférieur et du hourdis béton.**

**18- Prestressing of the top slab underside.**

**19- Prestressing of the top slab underside and the concrete top slab.**

- Géométries multiples et non symétrique du caisson ;
- Position théorique des câbles légèrement différente lors des vérifications sur site.

Afin de limiter les risques de conflits entre les différents systèmes de réparation et les existants, une maquette 3D de l'ouvrage a été réalisée sur AutoCAD, à partir d'un relevé 3D réalisé en période de préparation.

Les câbles de précontrainte ont également été intégrés dans cette maquette (figures 13 et 14).

### LA PRÉCONTRAÎTE ADDITIONNELLE

La précontrainte additionnelle longitudinale extérieure est assurée par la mise en œuvre de :

- 2 paires de câbles 19T15S par caisson filant d'une culée à l'autre, d'une longueur d'un peu plus de 200 m ;
- 2 paires de câbles 27T15S par caisson filant d'une pile à l'autre, d'une longueur de 100 m environ.

Les systèmes de précontrainte utilisés sont les systèmes VSL type E6-19 et E6-27. Les câbles sont déviés sur piles et en travées par des déviateurs. Les gaines en PEHD ont été mises en œuvre à l'avancement, et raccordées entre elles par manchons électrosoudables. Des dispositifs de maintien provisoire des gaines de type « hamac » ont été mis en œuvre pour permettre les opérations d'enfilage des torons. Retendables, les câbles constitués de torons gainés-graissés ont été injectés au coulis de ciment préalablement aux opérations de mise en tension définitive. Les équipes de Vsl France, entreprise spécialisée de précontrainte et certifiée ASQPE, ont réalisé leur mise en œuvre.

Les câbles sont ancrés aux extrémités des tabliers et sur les piles par des



18

© PHOTO THÉÂTRE CHANTIERS BYTPRF



19

© PHOTO THÉÂTRE CHANTIERS BYTPRF

massifs d'ancrages, eux même cloués sur les nervures par une précontrainte transversale horizontale par barres de précontrainte de diamètre 50 mm. Au total 150 barres ont été nécessaires pour assurer la bonne transmission des efforts. La préparation des surfaces de contact entre l'ouvrage existant et les massifs est réalisée par scarification du béton par hydrodémolition (2800 bars).

Cette technique présente l'avantage de ne pas être traumatisante pour l'ouvrage à l'inverse du bouchardage ou du piquage (figure 15).

### LE RENFORCEMENT PAR FIBRES DE CARBONE

Près de 6 km de fibres de carbone ont été mises en œuvre par les CARC (Charge d'Application des Renfor-

cement Composites) de Vsl France. Le système V2C+ a ainsi été décliné pour répondre aux besoins de renforcements, selon les dispositions définies par les études d'exécution pour les différentes parties de l'ouvrage (de 1 à 3 couches, ancrées aux extrémités ou déviées selon la géométrie de l'ouvrage). Un revêtement esthétique de protection a ensuite été mis en œuvre



20

© PHOTOTHÈQUE CHANTIERS BYTPRF

sur le renforcements carbone extérieur (figures 16 et 17).

Les conditions climatiques rencontrées ont nécessité la mise en place d'un système de maintien des conditions d'application des renforcements (confinement et chauffage des parties d'ouvrage à renforcer).

### LA PRÉCONTRAINTÉ TRANSVERSALE DU HOURDIS INFÉRIEUR

Le renforcement du hourdis inférieur a été réalisé à l'aide de barres de précontrainte de diamètre 36 mm gainées et injectées à la cire pétrolière. Pour faciliter leur mise en œuvre et les opérations sur site, celles-ci ont été préfabriquées par demi-longueur en atelier. Des manchons ont été utilisés pour raccorder les éléments préfabriqués entre eux. Plus de 100 barres, tendues chacune à près de 40 t, viennent ainsi renforcer le hourdis (figures 18 et 19).

**20- Échafaudages.**

**20- Scaffolding.**

### LES ACCÈS

Un échafaudage suspendu en sous-face de l'ouvrage a été mis en œuvre pour la réalisation des travaux, limitant ainsi très fortement l'impact des travaux pour les usagers de la route (une seule nuit de coupure aura été nécessaire). Une passe navigable sur la Seine, en circulation alternée, a été conservée pendant l'ensemble des travaux, imposant un phasage et des opérations de transfert d'échafaudages pour le chantier.

Près de 250 t d'échafaudages ont été mis en œuvre (figure 20). □

### PRINCIPALES QUANTITÉS

**PRÉCONTRAINTÉ LONGITUDINALE : 20 t**  
**PRÉCONTRAINTÉ PAR BARRES : 150 barres de 50 mm / 100 barres de 36 mm**  
**INJECTION DE FISSURES : 450 m**  
**RENFORTÉMENT CARBONE : 550 m<sup>2</sup>**  
**BÉTON AUTOPLAÇANT (C45/55) : 130 m<sup>3</sup>**

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE : Conseil Départemental 91**  
**MAÎTRE D'ŒUVRE : Conseil Départemental 91**  
**CONTRÔLE EXTÉRIEUR : Cerema**  
**ENTREPRISE GÉNÉRALE : Bouygues TP Régions France**

#### PRINCIPAUX SOUS TRAITANT

**BUREAU D'ÉTUDES : Cogeci**  
**ÉCHAFAUDAGES : Arnholdt**  
**HYDRODÉCAPAGE : Technique Haute pression**  
**ARMATURES : Sendin**  
**FORAGE SCIAGE : Atdb**

#### ABSTRACT

### STRENGTHENING THE PATTON BRIDGE AT ÉVRY

SAMY AMMAR, BOUYGUES TP - CYRIL COTTEY, COGECI - VIRGINIE GAIGNIER, COGECI

**The bridge on the RD93 road between Évry and Étioilles (Patton Bridge), built in the early 1970s, carries dense daily road traffic. The current disorders reveal the design shortcomings of this type of structure at the time: cracking of the top slab and girders, and pronounced sag in the middle of the centre span. The strengthening works were started in June 2016 and completed in March 2017. They included external longitudinal prestressing, girder strengthening with carbon fibres, and strengthening of the top slab underside with prestressing bars. This restored the bridge's full capacity. To reduce, insofar as possible, the nuisance caused to users by the works and the size of the structure, specific operating procedures and approaches had to be used.** □

### EL REFUERZO DEL PUENTE PATTON EN ÉVRY

SAMY AMMAR, BOUYGUES TP - CYRIL COTTEY, COGECI - VIRGINIE GAIGNIER, COGECI

**Construido a comienzos de los años 1970, el puente de la carretera departamental RD93 entre Évry y Étioilles (puente Patton) soporta un denso tráfico vial a diario. Las patologías actuales se deben a las carencias de diseño en la época en que se realizaron este tipo de construcciones: fisuración de la placa y las almas, flecha marcada en medio de la luz central. Iniciadas en junio de 2016 y terminadas en marzo de 2017, las obras de refuerzo, que incluyeron un pretensado longitudinal exterior, un refuerzo de las almas con fibra de carbono y de la placa inferior mediante barras de pretensado, han devuelto al puente su plena capacidad. La voluntad de reducir al máximo las molestias ocasionadas a los usuarios por las obras y las dimensiones de la construcción han obligado a utilizar modos operativos y accesos específicos.** □



© PHOTOTHÈQUE BOUYGUES TP RÉGIONS FRANCE

# LA PASSERELLE CYCLES - PIÉTONS D'ANDRÉSY

AUTEURS : SAMY AMMAR, RESPONSABLE TRAVAUX, BOUYGUES TP RÉGIONS FRANCE - ARNAUD ANDREYON, INGÉNIEUR TRAVAUX, BOUYGUES TP RÉGIONS FRANCE - CYRIL COTTEY, DIRECTEUR ADJOINT SERVICE OUVRAGE D'ART, BUREAU D'ÉTUDES COGECI

LA COMMUNE D'ANDRÉSY, SITUÉE DANS L'OUEST DU DÉPARTEMENT DES YVELINES, EST DESSERVIE PAR UN PONT ENJAMBANT L'OISE AU NIVEAU DE SA CONFLUENCE AVEC LA SEINE. LA PROXIMITÉ IMMÉDIATE D'UNE GARE RER EN FAIT UN OUVRAGE TRÈS EMPRUNTÉ RENDANT LA COHABITATION PIÉTONS, CYCLES, AUTOMOBILISTES DIFFICILE (PLUS DE 300 PIÉTONS PAR JOUR ET 22 000 VÉHICULES PAR JOUR). EN 2014, LE CONSEIL DÉPARTEMENTAL DES YVELINES DÉCIDE ALORS DE LANCER LE PROJET D'ÉLARGISSEMENT DE LA VOIE PIÉTONNE DE L'OUVRAGE AFIN D'Y CRÉER UNE PISTE CYCLABLE. LA PASSERELLE D'ANDRÉSY EST NÉE.

## LE PONT ET LA PASSERELLE (figure 1)

Construit après la seconde guerre mondiale, l'ouvrage en béton armé est composé d'un arc en caisson enjambant l'Oise sur lequel viennent s'appuyer deux tabliers d'accès en structure poteaux-poutres.

La passerelle, ajoutée sur le côté Nord de l'ouvrage est, quant à elle, une structure métallique composée de

consoles sur lesquelles reposent des profilés longitudinaux.

Le projet de base consistait à venir renforcer la structure de l'ouvrage existant avec deux poutres en béton armé coulées dans les caniveaux, puis à venir fixer les consoles de la passerelle en scellant des barres de précontrainte dans l'épaisseur des entretoises de l'ouvrage en béton (figure 2).

**1- Vue générale de l'ouvrage et de la passerelle.**

**1- General view of the bridge and foot bridge.**

## LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

### LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

Les études d'exécution du renforcement du pont d'Andrésy ont été réalisées avec les hypothèses suivantes :

- Règlement de calcul appliqué : règles Eurocodes.
- Charges considérées pour le recalcul de la flexion longitudinale et de la flexion transversale de



l'ouvrage : Eurocodes 1 Parties 2 : Actions sur les ponts, dues au trafic : NF EN 1991 -2.

- Étude de clouage des massifs d'ancrage de la précontrainte additionnelle : norme NFP 95-104.
- Étude de diffusion : guide du Setra « Diffusion des efforts concentrés » de novembre 2006.
- Étude des renforcements carbone : Recommandations provisoires de l'Afgc « Réparation et renforcement

**2- Projet initial de la passerelle.**  
**3- Modèle ST1.**

**2- Initial design of the foot bridge.**  
**3- ST1 model.**

des structures en béton au moyen des matériaux composites » de février 2011.

#### LES ÉTUDES DE FLEXION LONGITUDINALE

L'étude de flexion longitudinale a été réalisée sous le logiciel ST1 du Cerema à l'aide d'une modélisation filaire 3D de l'ouvrage, de type grille de poutres, le principe de cette modélisation étant de traduire le comportement de l'ou-

vrage au moyen de 3 grandes familles de barres :

- Les barres longitudinales modélisant les longerons des tabliers d'accès et les nervures longitudinales de la section caisson de l'arc.
- Les barres transversales modélisant les entretoises sur piles, et les entretoises de la section caisson de l'arc.
- Des barres transversales complémentaires (également appelées « lanières ») modélisant le comportement des hourdis des tabliers d'accès et de l'arc (figure 3).

On notera que le comportement de l'arc à la torsion a fait l'objet d'une étude particulière au moyen d'une modélisation complémentaire aux éléments finis sous le logiciel Robot, de manière à caler finement les raideurs des entretoises du caisson retenues dans la modélisation ST1, et ainsi obtenir une répartition transversale la plus précise possible des charges entre les nervures longitudinales de l'arc (figures 4 et 5).

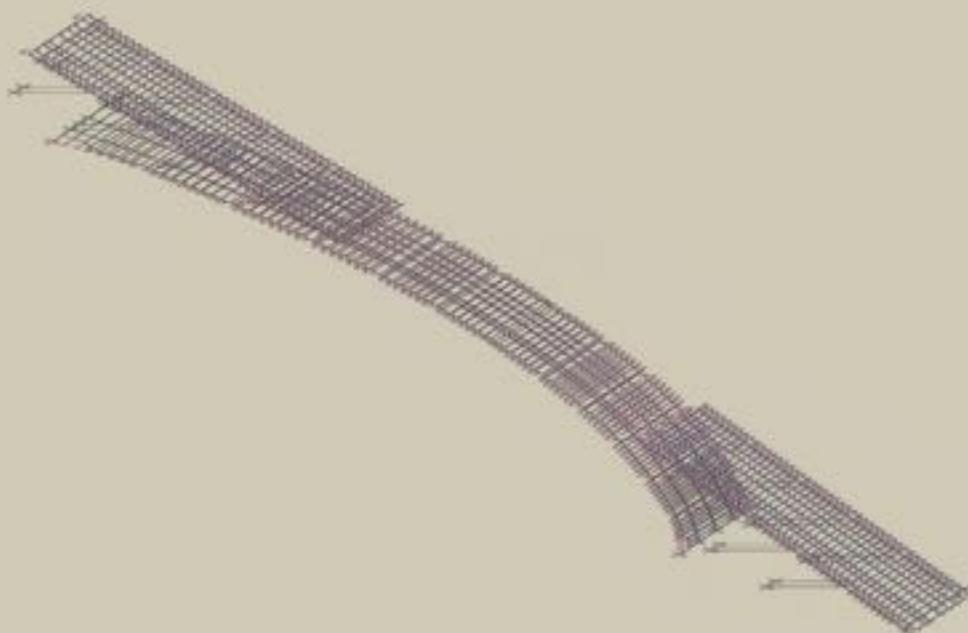
#### LES ÉTUDES DE FLEXION TRANSVERSALE DES TABLIERS D'ACCÈS

Une modélisation en éléments finis surfaciques a été réalisée sous le logiciel Advance pour l'étude de flexion transversale du hourdis des tabliers d'accès (figures 6 et 7).

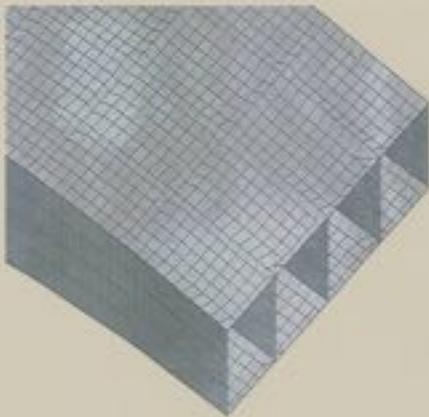
#### LES ÉTUDES DES ENTRETOISES ET DU CLOUAGE DES MASSIFS D'ANCRAGE

Les entretoises ont été vérifiées sur la base des sollicitations obtenues par le modèle ST1.

#### MODÈLE ST1

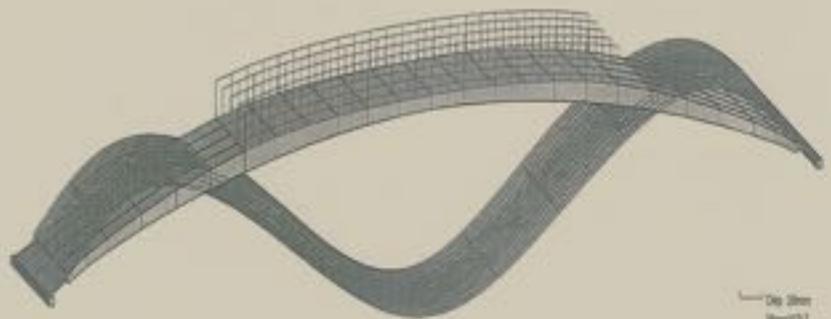


VUE MODÈLE ROBOT 1



4

VUE MODÈLE ROBOT 2



5

© PHOTO THÉRIÈRE COGECI

En complément, un modèle aux éléments finis de l'entretoise et des massifs a été réalisé sous le logiciel Robot pour étudier la répartition des contraintes de cisaillement à l'interface entre l'entretoise et ces massifs, et, ainsi, déterminer précisément l'effort de glissement global à clouer (figures 8, 9 et 10).

#### LES PRINCIPAUX PROBLÈMES RENCONTRÉS AU COURS DES ÉTUDES D'EXÉCUTION

Les études d'exécution ont mis en évidence des problèmes de justification sur les parties d'ouvrage suivantes :

##### **Ancrages des consoles**

Le système d'ancrage prévu au marché prévoyait d'ancrer les consoles au moyen de barres précontraintes scellées dans les entretoises.

Ce principe imposait de réaliser des carottages de grande longueur dans les entretoises et présentait un fort risque de sectionner les aciers transversaux. Les études d'exécution ont notamment mis en évidence qu'une modification de la position des tiges pouvait permettre de conserver un nombre de tiges conforme à la conception initiale mais impliquait une position de tige non compatible avec le ferrailage existant (interception importante d'aciers existants). Le principe d'ancrage de la console A1 sur la zone de l'arc présentait une seule file d'ancrage en partie haute de la platine, associée à la réalisation d'un massif cloué verticalement à l'arc situé sous la chaussée. Le système ainsi prévu semblait difficile à réaliser et discutable en termes de durabilité du fait de la présence des têtes d'ancrage positionnées dans le remblai sous chaussée.

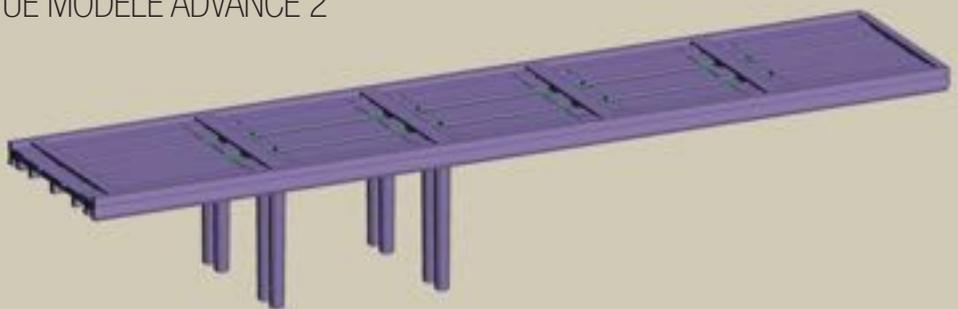
VUE MODÈLE ADVANCE 1



6

© PHOTO THÉRIÈRE COGECI

VUE MODÈLE ADVANCE 2



7

© PHOTO THÉRIÈRE COGECI

##### **Passerelle métallique/traverse**

La conception initiale prévoyait la mise en place d'une fausse console au droit des entretoises A2 et conduisait à avoir une portée spécifique de la passerelle de 18 m sur cette zone au lieu de 9 m pour la travée courante, cette particularité imposait d'avoir une section de longeron métallique renforcée pour franchir cette portée spécifique et impliquait des efforts importants sur les consoles A1 et A3 encadrant cette zone.

##### **Longerons de l'ouvrage existant**

Un manque d'armatures de flexion a été décelé en face inférieure des longerons L1, L2 et L3 sur les travées de rive.

##### **4- Vue modèle Robot 1.**

##### **5- Vue modèle Robot 2.**

##### **6- Vue modèle Advance 1.**

##### **7- Vue modèle Advance 2.**

##### **4- View of Robot 1 model.**

##### **5- View of Robot 2 model.**

##### **6- View of Advance 1 model.**

##### **7- View of Advance 2 model.**

##### **Entretoises de l'ouvrage existant**

Un manque d'armatures d'effort tranchant et de flexion a été mis en évidence sur les entretoises des tabliers d'accès.

##### **Pilettes de l'ouvrage existant**

Un manque d'armatures de flexion a été décelé en pied des pilettes P1a et P1b.

Ce manque d'armatures était dû à la modification de la répartition des efforts normaux dans les différentes pilettes d'une même file amenée par les nouvelles charges de la passerelle métallique (et associée aux effets du freinage sur le tablier).

## LES SOLUTIONS TECHNIQUES PROPOSÉES

### Répartition des travures de la passerelle

Comme évoqué au point précédent, le principe de ne pas avoir d'appui de la passerelle sur l'entretoise A2 (par l'emploi de fausse console) conduisait à avoir :

- Des sollicitations importantes dans les longerons métalliques de la passerelle et un choix de profilés renforcés pour cette zone.
- Des efforts sur les consoles A1 et A3 importants et des difficultés pour justifier les ancrages de ces consoles.

Nous avons donc proposé de supprimer les fausses consoles sur ces zones et de les remplacer par de vrais points d'appui pour la passerelle. Cela a permis de conserver une travure sur cette zone identique à la zone courante (9 m environ) et d'avoir un niveau d'effort sur les ancrages sensiblement identiques pour toutes les consoles de l'ouvrage et permettant une certaine uniformisation du principe d'ancrage.

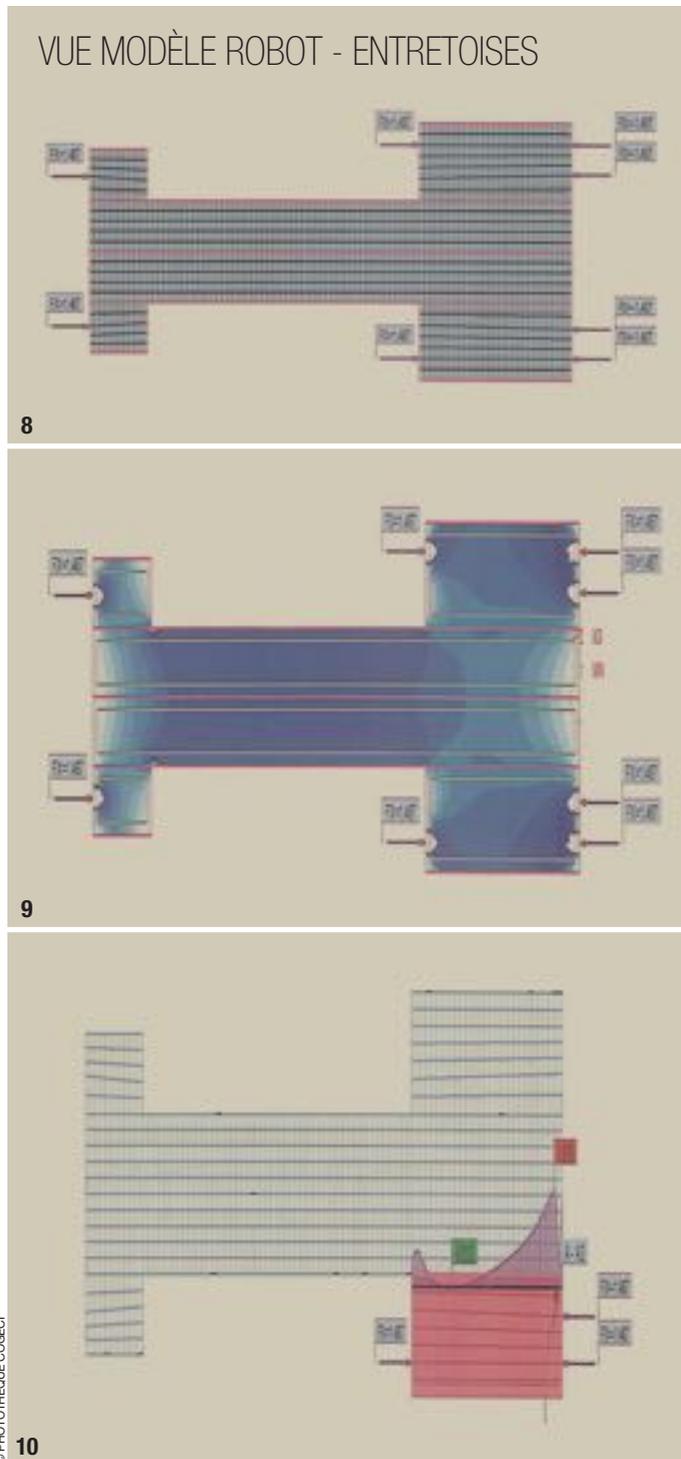
8, 9 & 10- Vue modèle Robot - Entretoises.

11- Vue 3D - Nouveau projet de la passerelle.

8, 9 & 10- View of Robot model - Cross ties.

11- 3D view - New design of the foot bridge.

## VUE MODÈLE ROBOT - ENTRETOISES



© PHOTOTHÈQUE COGECI

### Principe d'ancrage des consoles de la passerelle / renforcement des entretoises

#### Ancrage sur la zone de tablier :

Nous avons proposé de doubler les consoles au niveau de chaque entretoise, et d'aménager des bossages d'ancrage de part et d'autre des entretoises de manière à :

- Diviser les efforts d'ancrage par deux pour pouvoir optimiser la position et le nombre de tiges de précontrainte.
- Supprimer les carottages dans les entretoises existantes et supprimer les risques associés de coupure d'aciers existants, préjudiciables à la résistance des entretoises.
- Permettre un mode d'ancrage par plaque d'appui arrière et supprimer le mode d'ancrage par adhérence. Un ancrage par plaque est en effet plus sécuritaire qu'un ancrage par adhérence qui peut être sujet à d'éventuels aléas de réalisation (contrainte d'adhérence à l'interface coulis/béton existant non conforme à celle attendue...).

Nous avons proposé également de solidariser ces bossages à l'entretoise existante au moyen de barres de précontrainte longitudinales de manière à :

- Faire participer les bossages dans la résistance globale de l'entretoise (tranchant et flexion).
- Faire transiter l'effort normal provenant de la précontrainte de clouage des consoles vers l'entretoise existante. Ainsi les problèmes de manque d'armatures de flexion en face supérieure de l'entretoise coté console se trouvaient compensés par cet apport de compression. ▷

## VUE 3D - NOUVEAU PROJET DE LA PASSERELLE



→ Selon la même approche, du fait que la zone centrale des entretoises entre les longerons L2 (sous le longeron L1) présentait également un déficit d'armature en face inférieure, nous avons proposé d'ancrer 4 des 8 barres, destinées au clouage de la console, dans un bossage situé sur la rive opposée (entre L3 et L4). Ainsi les problèmes de manque d'armature de flexion en face inférieure de l'entretoise se trouvaient également compensés par cet apport de compression.

**Ancrage sur la zone d'arc :**

Pour les ancrages sur la zone d'arc, un système différent a été proposé puisque la structure porteuse constituée par la rive de l'arc se trouvait plus basse que sur la zone de tablier (où la présence du longeron L4 en rive de tablier empêchait l'utilisation d'un tel système). Sur cette zone, la solution technique retenue a consisté à ancrer les consoles dans un massif béton situé sur le hourdis de l'arc :

- Démolition de la zone de caniveau et réalisation sur cette zone d'un massif béton armé ancré au hourdis de l'arc par des armatures verticales scellées travaillant en cisaillement.
- Mise en œuvre sur la platine des consoles de goujons permettant de faire transiter l'effort tranchant de la console vers le massif béton, une réservation étant aménagée dans la zone du bossage pour faire pénétrer les goujons, et clavée après réglage et pose de la console.
- Ancrage dans le massif béton réalisé à l'aide de tiges munies à leur extrémité d'une plaque de répartition boulonnée, système destiné à la reprise des efforts de flexion.



12

© PHOTOTHÈQUE BOUYGUES TP RÉGIONS FRANCE

Ce principe présentait l'avantage de supprimer toute intervention sur la chaussée et/ou à l'intérieur de l'arc, et était applicable pour toutes les consoles ancrées sur l'arc.

**Renforcement des longerons**

Des manques d'armatures de flexion ont été identifiés sur les longerons L1, L2 et L3 sur les travées de rive.

Nous avons proposé de réaliser un renforcement en tissu de fibres de carbone en sous face des longerons sur les zones en question.

**Renforcement des pilettes**

Des manques d'armatures de flexion ont été identifiés en pied de certaines pilettes (pilettes encastrées sur P1a et P1b).

**12- Application du témoin en fibre de carbone.**

**13- Coffrage en sous face de tablier.**

**14- Bétonnage des massifs sur arc.**

**12- Application of the carbon-fibre mortar patch.**

**13- Formwork on the deck underside.**

**14- Foundation concreting on arch.**

Nous avons proposé de réaliser un renforcement en béton armé de la base des pilettes :

- Scellement d'armatures verticales dans la fondation des pilettes (armatures travaillant à la flexion).
- Scellement d'armatures horizontales rayonnantes à la base de la pilette (armature de liaison de la partie béton rajoutée à la partie existante).
- Réalisation d'un gainage en béton armé de 13 cm d'épaisseur sur 1,50 m de hauteur (figure 11).

**LA RÉALISATION DES TRAVAUX**

Préalablement à la pose de la charpente, l'ouvrage est renforcé afin de pouvoir supporter les nouvelles charges apportées.

Des renforcements en tissu de carbone sont appliqués sous certaines poutres pour les renforcer à la flexion et sur l'arc pour les efforts tranchants (figure 12). Les pilettes sont, elles, renforcées par épaissement de leur section en pied.

Une fois ces travaux achevés, les massifs destinés à servir d'ancrage aux consoles de la passerelle et de renforcement pour les entretoises de l'ouvrage existant, sont réalisés en sous-face d'ouvrage. La grande complexité de ces travaux était principalement liée à l'exiguïté des postes de travail (figure 13).

Le maintien en exploitation de l'ouvrage pendant les travaux rendant impossible le bétonnage avec des moyens traditionnels (pompe et pumi), un béton spécifique, à la fois suffisamment fluide pour être transporté sur plus de 40 m et développant des résistances suffisamment élevées pour supporter les efforts de précontrainte, est préparé



13



14

© PHOTOTHÈQUE BOUYGUES TP RÉGIONS FRANCE



15



16

sur chantier et mis en place grâce à une pompe de faible encombrement (figure 14).

Le renforcement des entretoises de l'ouvrage et la fixation des consoles de la passerelle sont assurés par des barres d'une longueur de 12 m environ, traversant la largeur de l'ouvrage et venant s'ancrer sur l'extrémité opposée du pont. Afin de réduire au maximum l'impact sur la circulation routière, la barre de précontrainte et la gaine de protection sont montées et remplies de cire pétrolière en usine. L'ensemble est ensuite enfilé à l'aide d'un camion-bras positionné en demi-chaussée (figure 15).

**15- Mise en place des barres de précontrainte de fixation de la passerelle.**

**16- Mise en tension des barres de fixation de la passerelle.**

**15- Positioning the prestressing bars fastening the foot bridge.**

**16- Tensioning of foot-bridge fastening bars.**

Ces travaux achevés, la charpente métallique peut alors être montée. Les consoles, manutentionnées de manière identique aux barres préfabriquées, sont d'abord positionnées provisoirement le temps du réglage puis bloquées avec un mortier de calage.

À l'achèvement de cette opération, les barres de fixation de la passerelle sont tendues par les équipes de Vsl France, entreprise spécialisée de précontrainte et certifiée ASQPE (figure 16). Le reste de la charpente (longerons puis plate-lage) a ensuite été installé. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**PRÉCONTRAINTE PAR BARRES :** 64 barres de 40 mm / 80 barres de 36 mm

**MICROBÉTON :** 55 m<sup>3</sup>

**CHARPENTE MÉTALLIQUE :** 425 m<sup>2</sup> de platelage métallique et 114 t de charpente

**FIBRE DE CARBONE :** 434 m

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Conseil Départemental 78

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Conseil Départemental 78

**CONTRÔLE EXTÉRIEUR :** Socotec

GROUPEMENT D'ENTREPRISE

**TRAVAUX DE RENFORCEMENT ET DE CHARPENTE :** Bouygues Tp Régions France (mandataire)

**TRAVAUX DE VOIRIE :** Le Foll Tp

PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS

**BUREAU D'ÉTUDES :** Cogeci

**FABRICATION ET POSE DE LA CHARPENTE :** Accma

**CAROTTAGE :** Atdb

**MOYENS D'ACCÈS :** Alliance Echafaudage et Structure

**ÉQUIPEMENT :** Mice

## ABSTRACT

### THE BICYCLE AND PEDESTRIAN BRIDGE AT ANDRÉSY

SAMY AMMAR, BOUYGUES TP - ARNAUD ANDREON, BOUYGUES TP - CYRIL COTTEY, COGECI

The district of Andrésy is accessed by a bridge straddling the Oise River at the level of its confluence with the Seine. The presence of an "RER" rapid transit system station in the immediate neighbourhood means it is a structure heavily trafficked by pedestrians, cyclists and motorists. In 2014, the Yvelines Departmental Council decided to launch a project for enlargement of the bridge's pedestrian path in order to create a bicycle path. The reinforced concrete structure consists of a box girder arch straddling the Oise supporting two access decks in a column and beam structure. The foot bridge, added on the north side of the bridge, is a steel structure formed of brackets supporting longitudinal sections. The project involves strengthening the structure of the existing bridge and fastening to the deck steel brackets supporting the foot bridge by means of prestressing bars. □

### LA PASARELA PARA BICICLETAS Y PEATONES DE ANDRÉS Y

SAMY AMMAR, BOUYGUES TP - ARNAUD ANDREON, BOUYGUES TP - CYRIL COTTEY, COGECI

El municipio de Andrésy está comunicado por un puente sobre el río Oise a nivel de su confluencia con el Sena. La proximidad inmediata de una estación de cercanías lo convierte en una vía muy transitada por peatones, ciclistas y automóviles. En 2014, el Consejo Departamental de Yvelines decidió lanzar el proyecto de ampliación de la vía peatonal del puente para crear un carril bici. La construcción de hormigón armado está formada por un arco en forma de caja que cruza el Oise, sobre el cual se apoyan dos tableros de acceso con estructura de postes y vigas. La pasarela, añadida en el lado norte de la construcción, es una estructura metálica formada por ménsulas sobre las que reposan unos perfiles longitudinales. El proyecto incluye un refuerzo de la estructura de la construcción existente y la fijación al tablero de ménsulas metálicas que soportarán la pasarela mediante barras de pretensado. □



1  
 © GRÉGOIRE KOULBANIS/PHILOBATES

# TECHNIQUES INNOVANTES POUR LA SAUVEGARDE DU PATRIMOINE GÉNIE CIVIL

AUTEUR : CHRISTIAN TRIDON, PRÉSIDENT DU STRES

**RÉPARER OU RENFORCER : DES ACTIONS QUI CONTRIBUENT À LA SAUVEGARDE DU PATRIMOINE BÂTI. LES MATÉRIAUX TELS QUE LE BÉTON ARMÉ ET L'ACIER VOIENT LEURS PERFORMANCES MÉCANIQUES DIMINUER PAR LA RÉPÉTITION DES CONTRAINTES QU'ILS SUBISSENT MAIS AUSSI PAR LES EFFETS DE L'ENVIRONNEMENT ET DES AGENTS EXTÉRIEURS NATURELS (EN PARTICULIER LE CO<sub>2</sub> ET LES CHLORURES SOUS DIFFÉRENTES FORMES). LES TECHNOLOGIES DE RÉHABILITATION CONSISTENT À REDONNER À CES OUVRAGES LEURS CONDITIONS DE SERVICE ATTENDUES.**

## RÉHABILITATION DU FORT DU MOULIN DE PORT-CROS PAR TECHNIREP

**Le fort du Moulin, ouvrage militaire français situé sur l'île de Port-Cros (Var) bâti en 1531, menaçait de s'effondrer suite à un éboulement de falaise. Le Parc national de Port-Cros a lancé d'importants travaux de rénovation avec l'entreprise Technirep (Groupe Etpo) spécialiste du renforcement de structures.**

Classé monument historique, le fort du Moulin de Port-Cros a été édifié au XVI<sup>e</sup> siècle sur un haut rocher en schiste. Suite à l'effondrement d'une

partie de la falaise, des travaux d'urgence ont été engagés. Un trou profond s'était en effet formé sous l'imposant mur d'enceinte du fort, menaçant la stabilité du bâtiment. Pour stopper ce phénomène de dégradation naturelle et assurer la pérennité de l'ouvrage, un vaste programme de travaux a été engagé avec une première phase entre octobre 2016 et avril 2017. Deux autres phases sont prévues en 2018 et 2019.

### CHANTIER COMPLEXE

Ce chantier relevait plusieurs défis : la sécurité, la pérennité géotechnique, le respect du monument historique, les

**1- Confortement de la falaise, vue générale.**

**1- Cliff consolidation, general view.**

exigences environnementales. Première étape, le confortement du rocher avec un cloutage de la paroi jusqu'à 6 à 8 m de profondeur, la reprise de la fondation du fort à l'aide d'une longrine en béton armé (ferraillage puis projection du béton afin de remplacer les roches qui

se détachent) (figure 1). « Nous avons repris les efforts verticaux en plaçant la longrine dans le trou et redescendu les efforts par treillis soudé. Pour les efforts horizontaux, nous avons mis des tirants de diamètre 32 mm pour la partie courante, et de diamètre 52 pour la première partie longrine » explique Christophe Paulard, directeur général de Technirep.

Le défi consistait à faire travailler et se déplacer jusqu'à 10 techniciens au plus fort du chantier. Les techniques sur corde ont été privilégiées pour la purge puis le forage, et des échafaudages ont été montés sur environ 400 m<sup>2</sup> pour le renforcement et l'habillage (figure 2).



© GRÉGOIRE KOULBANIS/PHILOBATES

2

## RESPECT DU MONUMENT HISTORIQUE

Deuxième étape : la mise en œuvre de techniques traditionnelles pour la restauration des maçonneries en moellons de schiste et la reconstitution du soubassement en parement du béton armé.

Il s'agit d'un parement de 37 m<sup>2</sup> avec des pierres de recouvrement visant à redonner au site son aspect originel. « C'est un monument historique du XVI<sup>e</sup> siècle. Nous avons utilisé les blocs

2- Exécution de la longrine de support.  
3- Vue d'ensemble depuis un drone.

2- Execution of the supporting longitudinal member.  
3- Overall view from a drone.

de schiste sur place pour l'habiller, afin que la jupe constitue un cône naturel par rapport au rocher » précise Christophe Paulard.

L'enduit de la construction a été réalisé avec les techniques d'époque, à base de chaux notamment.

## CONSTRAINTES LOGISTIQUES ET ENVIRONNEMENTALES

Plus de 300 t de matériel devaient être acheminées tout au long du chantier par voie maritime du service public.

Le bateau ayant une capacité de 30 t et des créneaux de navigation spécifiques, il a fallu faire de nombreux trajets. L'acheminement du matériel du port au fort s'est avéré délicat en particulier pour le béton projeté et les tirants. Une piste a donc été spécialement aménagée pour la durée des travaux. De plus, le site étant un haut lieu de la biodiversité, une attention particulière a été portée sur l'environnement. Chacun s'est employé à importer le minimum de matériaux (préalablement nettoyés), à minimiser la projection de poussière, à reconnaître et préserver la flore.

**MAÎTRE D'OUVRAGE :**  
**Parc National de Port-Cros**  
**MAÎTRE D'ŒUVRE :**  
**Jean Gettner architecte du patrimoine**

## RCA : CHANGEMENT DES JOINTS DU VIADUC SAINT-JACQUES À CLERMONT-FERRAND

**Le viaduc Saint-Jacques, à Clermont-Ferrand, souffrait de pathologies liées à son âge (50 ans) et à des infiltrations d'eau dont l'origine remonte à la création de la plateforme du tramway (rails et enrobé). Des travaux ont donc été effectués par l'entreprise Rca, qui a refait les joints de dilatation.**

Très fin et souple, le viaduc est un ouvrage VIPP (viaduc travée indépendante précontraint) long de 450 m (comportant 13 travées de 35 m) avec une pente de 6%. Avec le passage du tramway, l'augmentation du trafic routier, l'agrandissement de la ville, l'artère est devenue de plus en plus fréquentée. Des bâtiments ont aussi été construits en-dessous du pont autour des piles (figure 3) L'ouvrage a accumulé des problèmes d'infiltration d'eau et d'étanchéité.

La Société Mixte des Transports en commun de l'agglomération Clermontoise (Smtc) a décidé de lancer des travaux de réhabilitation. Il s'agit de raboter la chaussée existante et la plateforme du tramway. Après la phase de démolition, il faut reconstituer l'étanchéité, le système de drainage, les joints, la plateforme.

Pour Rca, 14 lignes de joints de chaussée (16 m de long chaque) sont à refaire, avec une pente de 6% sur une grande longueur. Le chantier a duré d'avril à novembre 2016 et nécessité l'interdiction à toute circulation (tramway, voitures, vélos, piétons) pendant 7 mois. ▷



© RIOT HOUSE

3

## FABRICATION DE JOINTS SPÉCIAUX

« Avec une telle pente, il y a beaucoup de ruissellement d'eau. Il a fallu évacuer l'eau à chaque travée, de chaque côté » explique Pascal Salanne, chef de secteur Rca Sud Ouest. Autre contrainte : la ligne du tramway. « Nous avons passé les joints de chaussée en continu sous le rail, grâce à des pièces spéciales. Soit 4 décalages altimétriques différents sur les 14 lignes de joints, au millimètre près » poursuit Pascal Salanne (figure 4).

Ces pièces ont été fabriquées sur site (angles et longueurs différentes), à l'aide de deux postes à souder semi-automatiques et de scies pendulaires rotatives aluminium.

Cet équipement a permis de couper chaque profilé à l'angle voulu et de souder sur place pour parfaire l'étanchéité par la continuité du joint sous le rail tram.

## INNOVER AVEC TOUT TYPE DE JOINT

« Nous avons déjà l'expérience de ce type de chantier en pente avec une ligne de tramway. Là c'était un nouveau challenge, il fallait reprendre des points singuliers en respectant les particularités de l'ouvrage d'art » ajoute le chef de secteur. « L'innovation c'est savoir faire tout type de joint même en vertical, sous des rails ». Sur le viaduc Saint-Jacques cela représente 300 m de joints, 48 points singuliers altimétriques, 25 t de béton, et jusqu'à 20 ouvriers et 2 conducteurs de travaux.

### MAÎTRE D'OUVRAGE :

Smtc

### MAÎTRE D'ŒUVRE :

Ingerop Clermont

## RÉPARATION DU PONT D'ORMOY AVEC POA

La RD 191 franchit l'autoroute A6 sur la commune d'Ormoiy grâce à un ouvrage en béton armé. Ce pont, datant de 1958, est composé de trois travées indépendantes reposant sur deux piles et deux culées. La travée centrale a une portée de 28 m avec un tablier reposant sur cinq poutres principales. Les travées de rive ont une portée de 16,5 m avec un tablier reposant sur quatre poutres principales. Le Département de l'Essonne a mené des travaux de renforcement structurel et de réfection des équipements de l'ouvrage avec l'entreprise Poa.



4 © RIOT HOUSE

Éclats de béton, corrosion de l'acier, défauts d'étanchéité du hourdis : les pathologies étaient nombreuses.

Les inspections ont mis à jour une fissuration importante des éléments structurels (poutres principales, entretoises et hourdis). Un phénomène qui s'explique par le sous-dimensionnement de l'ouvrage et la forte augmentation du trafic routier, notamment des convois exceptionnels.

Au niveau des appuis et sur les culées, on observe des tassement liés au problème de portance des sols, de présence d'eau et de poussée à l'arrière des murs garde-grève.

### ÉCHAFAUDAGE SUSPENDU

L'ouvrage étant sous-dimensionné et compte tenu des fissurations, il a fallu commencer par le renforcement intrados. « La première phase concernait les travaux de renforcement structurel

### 4- Bétonnage en cours.

### 5- Photo aérienne-phase de renforcement de la partie inférieure de l'ouvrage.

### 4- Concreting in progress.

### 5- Aerial photo: phase of consolidation of the lower part of the structure.

de la sous-face de l'ouvrage. Ils ont nécessité la fixation d'un échafaudage suspendu au-dessus de l'A6 car il était impossible de travailler à partir des voies en fermant la circulation sur cet

axe majeur. Nous en avons profité pour rehausser les corniches et remplacer les garde-corps » explique Romain Chaplain, responsable de l'agence Poa de Fontainebleau. Les travaux de purge des bétons en intrados ont mis en évidence des défauts au niveau de l'ossature métallique du pont.

Des injections ont été faites dans les fissures avant la mise en œuvre du tissu en fibre de carbone (TFC) qui permet de renforcer les poutres longitudinales du tablier (figure 5). La pose du TFC a nécessité deux échafaudages fixes sur les deux travées latérales et à un échafaudage suspendu sur la travée centrale. Cette opération s'est déroulée principalement de nuit, totalisant 1 000 m d'injection de fissure et 250 m<sup>2</sup> de renforcement TFC.

### LIAISON DE RENFORT

La deuxième phase, consacrée aux travaux en extrados, s'est déroulée en plusieurs étapes : réalisation d'un hourdis de renfort ancré au tablier, réfection de l'étanchéité, création de dalles de transition avec réfection des garde-grève, modification des trottoirs. « Nous avons ajouté une liaison de renfort entre la contre-dalle et les poutres principales par l'intermédiaire de 800 ancrages en plus des 2800 dans le tablier » poursuit Romain Chaplain.

L'ancien tablier existant a servi de coffrage pour créer une dalle béton par-dessus. Pour faire le lien entre l'ancien et le nouveau tablier, Poa a utilisé un système tulipé (barres métalliques assurant la liaison).



5 © SERVAVISION



© SARL ROMOEUF  
6

### PAROI BERLINOISE

Autre particularité du chantier, Poa a installé une paroi berlinoise pour soutenir la voie circulée tout en permettant les terrassements à l'arrière des murs : « Nous avons pu refaire les garde-grève sans couper la circulation. Les nouveaux garde-grève ont été dimensionnés pour être auto-stables en liaison directe avec les pieux de fondations par des ancrages. La continuité des murs entre la première et la deuxième phase a été possible par la mise en place de coupleurs d'armature ».

Des travaux qui devraient redonner une longévité au pont d'Ormo, et qui se poursuivent cette année puisque Poa a récemment nettoyé les culées et refait le système d'évacuation des eaux au pied des piles et des culées.

### MAÎTRE D'OUVRAGE :

Service Ouvrage d'Art  
du Département de l'Essonne

### MAÎTRE D'ŒUVRE :

Ecerp

### TRAVAUX SUBAQUATIQUES ET TERRESTRES AU PONT DE RUELLE PAR ROMOEUF

Le pont sur la Trouve (Dcns, site d'Angoulême à Ruelle) qui permet l'accès au Bâtiment 38, est un ouvrage composé de 5 appuis en maçonnerie de pierres de taille assisées réglées. Trois piles sont en eau, les deux culées sont bordées en rive gauche amont par un mur maçonné, et en rive gauche aval et rive droite par des bâti-

**6- Nettoyage du substrat à la lance à eau sous pression pour la future assise.**

**7- Remise en place des pierres d'origine de l'avant-bec et clavage des vides par injection de mortier spécial.**

**6- Substrate cleaning with a pressurised water spray lance for the future foundation.**

**7- Placing the cutwater's original stones back in position and interstice keying by special mortar grouting.**

**ments. La société Romoeuf, à la fois spécialiste des travaux subaquatiques et travaux spéciaux, a pu remettre en état le pont.**

L'ouvrage montrait un affouillement de l'avant-bec et du quart du fût de la pile P1, suite à une érosion massive du contact rocheux avec les fondations, provoquant un affaissement de 25 cm. L'originalité des travaux consistait à mettre l'ouvrage hors d'eau en subaquatique, avant la mise en place des techniques terrestres. Le chantier s'est déroulé en juin/juillet 2016 pendant 6 semaines.

### BATARDEAU EN BIG BAG

Trois scaphandriers ont réalisé les travaux subaquatiques. Pour éviter une installation lourde et coûteuse, l'équipe a opté pour une technique de batar-

deau provisoire composé de big-bags, transportés à la grue.

Les scaphandriers l'ont placé au fond, puis assuré la mise à sec sur deux travées en amont et en aval de l'ouvrage. « La technique du big bag est pertinente jusqu'à 2 m de hauteur d'eau. Elle est rapide, flexible, étanche, peu coûteuse et sans impact sur l'environnement » explique Sylvain Romoeuf, dirigeant de l'entreprise. Les scaphandriers ont pu réaliser l'étanchéité par bandes de polyane (30x5 m) sur le parement du batardeau afin de créer une zone étanche entre les big-bags.

### ENLÈVEMENT DE L'AVANT-BEC DE LA PILE (5 t)

Seconde étape : l'enlèvement du massif maçonné composant l'avant bec ainsi que le quart de fût par grutage puis mise en recette dans l'intérieur du batardeau. « Ce n'est pas courant de retirer un tel bloc et de le reconstituer à l'identique » souligne Sylvain Romoeuf. L'équipe a ensuite assuré l'enlèvement localisé de l'assise de fondations (pierres de libage de 0,80 m de large, 1 m de long et 0,30 m d'épaisseur). Les scaphandriers ont procédé à la purge des matériaux rocheux issus du substratum local à la lance à eau sous pression de 10 bars (figure 6). Cette purge a permis d'éliminer les limons et les résidus calcaires afin d'atteindre le substrat rocheux sain. Au total 20 à 30 cm d'épaisseur sur environ 5 m<sup>2</sup> ont été retirés.

### MODE OPÉRATOIRE

- Mise en place des ancrages de liaison entre le substrat et la nouvelle embase de fondation en béton armé.
- Foration pneumatique sur l'emplacement de l'embase (5 m de long x 1,50 m de large) au travers du substrat Ø 30 mm sur une profondeur de 1 m, et scellement de barres HA 14 mm à la résine.
- Réalisation d'un premier bétonnage de pied.
- Réalisation de la nouvelle base de fondation. Deux nappes superposées de treillis soudé Ø 9 mm ont été installées.

### REMISE EN PLACE DE L'AVANT BEC MAÇONNÉ

L'avant bec a été remis en place ainsi que 4 pierres de taille du fût (figure 7). Le remontage du pied du fût et du massif a été élingué à l'aide de la grue et disposé sur la nouvelle embase, puis roulé et tiré à l'aide de sangles à cliquet. ▷



© SARL ROMOEUF  
7

Le clavetage des vides entre pierres de taille a été réalisé par injection gravitaire d'un mortier spécial afin d'obtenir un remplissage de scellement des pierres de maçonnerie. Et pour finir : rejointoiement général des parements.

**MAÎTRE D'OUVRAGE / MAÎTRE D'ŒUVRE :**  
**Dcns**

**CONFORTEMENT DE FALAISE À CHAMBÉRY PAR OUEST ACRO**

**La falaise des Monts à Chambéry (73) a été protégée contre les éboulements rocheux par l'entreprise Ouest Acro, spécialisée dans les travaux d'accès difficile. Un chantier particulièrement technique confiné en milieu périurbain, avec hélicoptage et scellement à la résine.**

Suite aux risques de chute de blocs au droit de la falaise des Monts, au-dessus de l'avenue d'Aix-les-Bains à Chambéry, un programme de sécurisation du site a été lancé. D'une hauteur de 35 à 55 m sur un linéaire d'environ 350 m, la falaise surplombe une douzaine d'habitations. Un contexte foncier contrai-

gnant avec le Domaine des Monts, des parcelles privées ou publiques à l'amont et à l'aval de la falaise qui n'a pas empêché Ouest Acro, spécialiste des travaux d'accès difficiles sur cordes, de mener ce chantier de confortement.

**PHASAGE DU CHANTIER**

Première étape : la mise en place d'un balisage des accès en tête de falaise et la protection provisoire des ouvrages et des personnes. Seconde étape : débroussaillage et nettoyage de la zone de travail, implantation/piquetage (matérialisation de l'emprise de la zone grillagée par la définition sur le terrain de la ligne de tête et de la ligne de pied), pose de boulons d'ancrage de fixation (grillage), boulons d'ancrage de confortement (clouage des masses à risque), installation d'un grillage métallique 60x80 mm.

**HÉLIORTAGE DU MATÉRIEL**

Compte-tenu de la difficulté d'accès, l'hélicoptère s'avère vite indispensable pour acheminer le matériel en tête de falaise. Il doit livrer les machines de forage (poids d'une machine ~300 kg), les matériaux notamment le grillage (13000 m<sup>2</sup> soit 26t, conditionné en

rouleaux d'environ 370 kg), les barres d'ancrage pour la fixation du grillage et le confortement (5t) et les câbles métalliques (~1,5t). Le corridor de vol comprend une largeur minimale de 50 m, tandis qu'une zone permet à l'hélico de se poser et de s'équiper pour les travaux de levage. « Dans ce contexte urbain, les moyens hélicoptés

sont nécessaires et permettent aux cordistes de travailler en sécurité, en évitant le port de charges lourdes en hauteur » précise Luc Boissard, dirigeant de Ouest Acro.

**TECHNIQUE DE SCELLEMENT À LA RÉSINE**

Suite à l'investigation géotechnique et à l'étude de trajectographie menées par le maître d'œuvre, la falaise a été divisée en 6 compartiments sensibles. Trois types de parades ont été définis : le grillage plaqué, le confortement par clouage et le grillage pendu sur poteaux.

Le plus important en surface est le grillage plaqué (13000 m<sup>2</sup>) maintenu en tête et pied par des boulons d'ancrage de fixation scellés à la résine (figure 8). « L'ancrage est scellé et foré à l'avancement, jusqu'à 3 m de profondeur. Sur 650 m de fixation grillage, l'utilisation de la résine représente un gain de temps important en termes de mise en œuvre et de forage » poursuit Luc Boissard (figure 9).

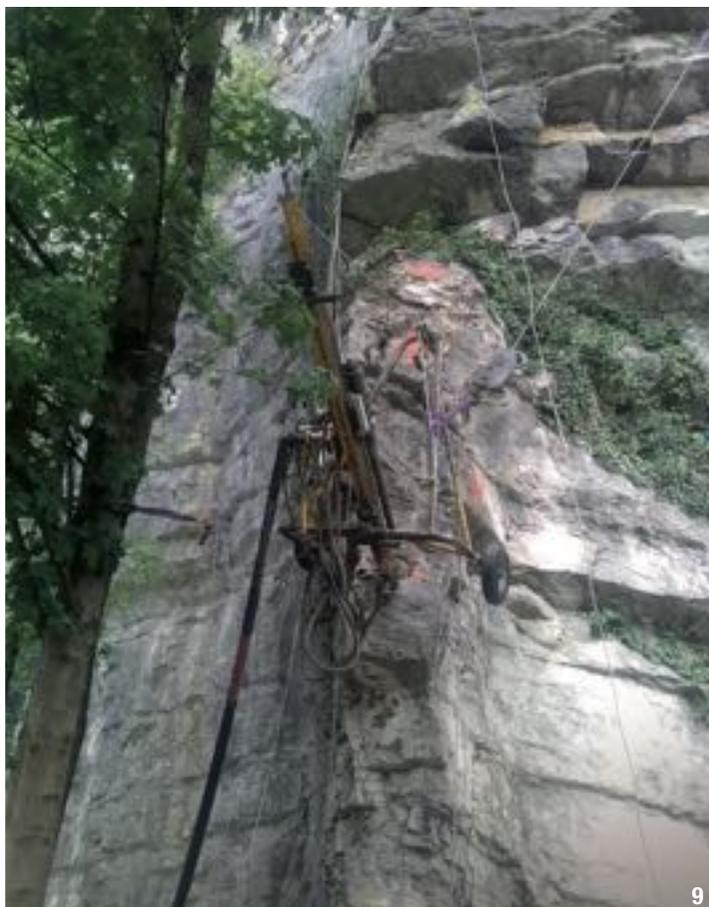
Le grillage est déposé en tête de falaise, avec un ancrage tous les 3 m. Les rouleaux de 4 m de large sont positionnés côte à côte puis déroulés à la main par les cordistes. Un chantier particulière-

**8- Ancrage de barres scellées à la résine sous surplomb.**

**9- Ancrage de confortement de masses rocheuses instables avec barres scellées à la résine.**

**8- Anchoring of resin-grouted bars under overhang.**

**9- Consolidation anchoring of unstable rock masses with resin-grouted bars.**



© OUEST ACRO



© FREYSSINET - F VIGOUROUX

10

ment technique, sur une falaise très verticale comprenant un surplomb de 6 m de profondeur sur 20 m de large à 30 m de hauteur.

**MAÎTRE D'OUVRAGE :**  
**Ville de Chambéry**  
**MAÎTRE D'ŒUVRE :**  
**Geolithe**

**TUNNEL DU PUYMORENS :**  
**FREYSSINET ASSURE**  
**LES TRAVAUX DE MISE**  
**AUX NORMES SÉCURITÉ**

Situé près de la principauté d'Andorre, le tunnel du Puymorens relie l'Ariège aux Pyrénées Orientales. Ce mono-tube de la RN20 situé à 1550 m d'altitude, d'une longueur de 4820 m, a fait l'objet de grands travaux de mise aux normes. Abris, gaine d'évacuation, protection thermique ont été mis en place par Freyssinet, chargé de la conception-réalisation du programme d'amélioration de la sécurité du tunnel.

**11 ABRIS**

Les travaux de génie civil ont consisté tout d'abord à créer 9 abris et à modifier 2 abris existants, pour doter le tunnel de 11 abris au total, distants de 400 m et permettant l'évacuation du public en cas d'incendie (figure 10). Ils communiquent par une galerie de

**10- Vue de l'entrée du tunnel de Puymorens.**

**11- Travaux de mise aux normes sécurité, vue intérieure.**

**10- View of the Puymorens tunnel entrance.**

**11- Safety retrofitting work, interior view.**



11

© FREYSSINET - F VIGOUROUX

raccordement qui débouche dans une galerie d'évacuation, située sur la dalle supérieure de l'ouvrage. Freyssinet a confié à Soletanche Bachy Tunnels le creusement de ces abris et galeries de liaison, puis a réalisé la mise en œuvre de l'étanchéité et le bétonnage des revêtements définitifs.

La conception des abris s'est focalisée sur les accès PMR pour répondre aux recommandations des autorités de tutelle des secteurs autoroutiers.

**GALERIE D'ÉVACUATION**

Initialement, la dalle supérieure du tunnel contenait les gaines de désenfumage et de ventilation de la zone

de circulation. Pour créer une galerie d'évacuation séparée de la gaine d'air vicié, il a fallu construire un voile sur 2400 m de long et modifier le synoptique du système de désenfumage du tunnel. Les équipes de Freyssinet ont donc conçu des éléments de voile préfabriqués suspendus à la voûte. L'étanchéité de cette gaine d'air frais a été particulièrement étudiée pour assurer une surpression constante en cas d'incendie. Ces éléments en béton armé ont été préfabriqués à Madrid par Terre Armée.

**PROTECTION THERMIQUE**

Pour garantir la sécurité des usagers en cas d'incendie et favoriser leur évacuation, 40 000 m<sup>2</sup> de plaques de protection thermique "Promat" ont été posées en sous-face de la dalle supérieure et ses appuis afin de les protéger du feu. Enfin pour éviter une montée en température supérieure à 40°C sous feu HCM 120, dans la galerie d'évacuation, les 4800 m du voile longitudinal ont également été protégés par des plaques "Promat".

**FAUX-TUNNELS**

La ventilation se trouvant modifiée par la création de la galerie d'évacuation, il était impératif de poser des accélérateurs (ventilateurs) aux entrées du tunnel afin de contrôler le courant d'air dans la zone de circulation.

Freyssinet a ainsi prolongé le tunnel à chaque extrémité par deux "faux-tunnels", faits de ponts-cadres préfabriqués longs de 20 m environ.

La présence d'une multitude de réseaux aux têtes de tunnel a occasionné des études spécifiques pour les fondations, qui ont dû être coulées avant les premières neiges. La pose a été effectuée dans la seconde phase des travaux.

**MISE AUX NORMES DE LA GESTION TECHNIQUE CENTRALISÉE (GTC)**

Les partenaires de Freyssinet ont refondu et modernisé intégralement tous les dispositifs de gestion des équipements du tunnel (figure 11) comme la ventilation, la signalisation variable de la zone trafic et particulièrement le système de Détection Automatisé des Incidents (DAI) qui gère les scénarii de mise en sécurité de la zone trafic.

**MAÎTRE D'OUVRAGE :**  
**Asf**  
**MAÎTRE D'ŒUVRE :**  
**Bg Ingénieurs conseils**



12



13

**VINCI : RÉHABILITATION  
DES FAÇADES DU K2  
À LA BASE DE LORIENT**

**La base Keroman (nom utilisé par les Allemands) ou base sous-marine de Lorient ("BSM" nom utilisé par l'armée française) demeure à ce jour le plus important patrimoine en béton construit en Europe. Gtm Ouest avec Tsp Sas, a mené un vaste chantier de restauration des façades de l'ouvrage de 75 ans avec des techniques novatrices : nettoyage pelliculaire à la vapeur, anodes sacrificielles, imprégnation issue des nanotechnologies.**

Érigée en 1942, la base de Lorient est la plus grande forteresse militaire d'Europe du XX<sup>e</sup> siècle. L'équipe Gtm Ouest - Tsp s'est attelée à remettre en lumière les quelque 9000 m<sup>2</sup> de trois premières façades pour l'unique blockhaus K2. Ce chantier de moins d'un an visait un objectif multiple : sécurisation des abords pour les usagers, augmentation de la durée de vie des bétons de façade, maintenance curative et préventive, tout en préservant l'intégrité des matériaux originels et en favorisant la mise en valeur du parement. Le site est devenu le siège d'une activité économique (on parle aujourd'hui de capitale européenne de la "sailing valley"), touristique et culturelle majeure : ses alvéoles abritent des entreprises, la Cité de la Voile, le pôle Course au large, et bientôt la nouvelle salle de musiques actuelles du Pays de Lorient.

**NETTOYAGE ET DÉCAPAGE  
PELLICULAIRES**

Le bâtiment présentant une grande variété de bétons et des problématiques dues au vieillissement, à l'ambiance marine et aux recouvrements biologiques, il s'agit de traiter l'ensemble

dans un esprit respectueux du patrimoine (figure 12). Comment reconstruire, là où ils sont dégradés, les bétons tels qu'ils ont été fabriqués il y a 75 ans et leur redonner leur aspect d'origine ? « *Tout d'abord, il a fallu déposer les filets fixés après-guerre puis s'atteler au nettoyage. À la vapeur plus ou moins saturée sous pression, hydro-gommage et avivage des peintures, techniques innovantes de nettoyage et décapage pelliculaires qui protègent l'épiderme du béton* » précise Nicolas Girard, responsable de l'agence Gtm Ouest Travaux Spéciaux. Il faut enlever les stigmates post-seconde guerre sans altérer les matrices ni les veinages des bois de coffrage pour les restituer dans leur état originel. Pour retrouver les lignes de l'ouvrage, l'équipe a utilisé un coffrage grim pant au calepinage.

**POSE DE 1 200 ANODES  
SACRIFICIELLES**

L'entreprise a mis en place 1 200 anodes sacrificielles, dont quelque 200 anodes sacrificielles hybrides qui permettent un traitement électrochimique de réalcanisation et de protection galvanique, par courant imposé temporaire et courant galvanique (figure 13). Grâce aux anodes raccordées aux aciers d'armature dans les zones de béton reconstitué, les dégradations périphériques par génération d'anodes induites sont empêchées. « *Nous contrôlons par enregistreur les quantités de courant de protection galvanique et les potentiels électrochimiques acier/béton sur des zones de contrôle déterminées* » souligne Nicolas Girard. Un système assez exceptionnel sur ce type d'ouvrage...

**ÉTUDE CHROMATIQUE ET  
TRAITEMENTS D'IMPRÉGNATION  
ISSUS DES NANOTECHNOLOGIES**

Pour obtenir la restitution esthétique



14

**12- Façade de la caserne des Mille après travaux de restauration - jusqu'à la cheminée.**

**13- Travaux de coffrage et de mise en place des anodes.**

**14- Travaux de finition sur enduit projeté.**

**12- Facade of the Mille barracks after restoration work - up to the fume stack.**

**13- Formwork and installation of anodes.**

**14- Finishing work on sprayed plaster.**

originelle des bétons, un travail de traitement chromatique et fonctionnel issu des nanotechnologies a été réalisé. Différentes études ont été effectuées pour les bétons de reconstitution à base de pigments minéraux et de sables issus des carrières locales (figure 14). Après des relevés spectro photo colorimétriques (par Lmdb), un traitement chromatique et fonctionnel a été appliqué à l'ensemble des parements de façades pour une cohérence finale. Les travaux ont pu se faire grâce à l'utilisation de plateformes élévatrices sur mâts et de nacelles de capacité 40 m pour accéder aux différentes zones d'intervention. Enfin le site -classé Natura 2000- imposait une gestion rigoureuse de la dimension écologique.

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :**  
**Lmdb Les Médecins du Béton,**  
**Atelier Amoros a3 d'architecture**  
**du Département de l'Essonne**  
**ARCHITECTE DU PATRIMOINE :**  
**Ph. Perron**  
**BUREAU D'ÉTUDE :**  
**Gueguen et Perennoud**



© ETANDEX 15

## ETANDEX RENFORCE ET ÉTANCHE LE PARKING DES GALERIES LAFAYETTE D'ANNECY

Situées dans le centre-ville d'Annecy, les Galeries Lafayette se démarquent par leur architecture singulière qui fait leur modernité. Ces derniers mois, Etandex a mis en œuvre des travaux de renforcement et d'étanchéité sur le parking R+2. Ce chantier innovant a fait appel à un large panel de savoir-faire en matière de réparation, dont les Galeries Lafayette sont aujourd'hui la vitrine.

L'équipement commercial d'Annecy est un établissement majeur en France, avec un édifice cubique à plusieurs étages qui abrite le grand magasin. Autour de ce cube, s'enroulent deux anneaux qu'occupent des parkings desservis par deux rampes. Citynove, branche immobilière du Groupe Galeries Lafayette qui gère et valorise le patrimoine immobilier de l'entreprise, a choisi de confier la rénovation du

parking R+2 à la société Etandex, entre septembre 2016 et juin 2017 (figure 15).

Les réparations de structure ont consisté à démolir et reconstruire 1 100 m<sup>2</sup> de dalle, traiter 1 000 m de fissures, réparer 2 600 m<sup>2</sup> de bétons dégradés et appliquer 500 m<sup>2</sup> de renforts composites.

**15- Parking des Galeries Lafayette à Annecy, vue d'ensemble.**

**16- Robot de projection de l'étanchéité résine.**

**15- Galeries Lafayette parking lot in Annecy, overall view.**

**16- Robot for spraying the resin grouting.**



16

## UN CHANTIER RÉALISÉ AVEC DE FORTES CONTRAINTES

Les travaux ont dû être réalisés avec le magasin en exploitation et les parkings du RDC et du R+1 accessibles au public, tout en maintenant les circulations par les rampes.

Les reprises structurelles lourdes ont dû être faites en dehors des horaires d'ouverture ou en fermant ponctuellement certaines zones.

Les approvisionnements et les évacuations de gravats (plusieurs centaines de m<sup>3</sup>) ont été assurés uniquement par grue mobile. Enfin il fallait libérer intégralement les zones de travaux lors des temps forts du magasin (3J, Noël et Soldes).

Autre contrainte : travailler en plein centre-ville et pendant la saison hivernale. « Nous avons créé des structures poutres-treillis couvertes de bâches thermoformées déplaçables, d'une surface de 1 800 m<sup>2</sup> afin de permettre le maintien des conditions d'application des produits et de s'affranchir des intempéries » explique Gil Espic, Directeur d'agence Etandex.

## SYSTÈME D'ÉTANCHEITÉ LIQUIDE PROJETÉE À CHAUD AU ROBOT

« L'étanchéité existante était assurée par un asphalte de 50 mm d'épaisseur, vieux d'environ 40 ans, sur un ouvrage présentant une faible pente. La pente générale devait être reprise afin d'atteindre un minimum de 1 % » poursuit Gil Espic. La structure ne pouvant reprendre que des charges additionnelles très limitées, les méthodes traditionnelles d'étanchéité n'étaient pas envisageables. La solution consistait à réaliser un rattrapage des formes de pente en micromortier et à appliquer un Système d'Étanchéité Liquide projetée à chaud sur près de 7 500 m<sup>2</sup> (figure 16). Afin de garantir une mise en œuvre optimale et de limiter la pénibilité, la projection a été mécanisée grâce à un robot contrôlant les paramètres de projection (fluidité, température, pression, débit, vitesse d'avancement) assurant une épaisseur constante. Etandex a ensuite appliqué une couche de roulement épaisse pour la protection de l'étanchéité et l'embellissement du parking, à base de quartz coloré pour assurer la stabilité de la teinte même après usure. Enfin, les parties métalliques défectueuses du garde-corps ont été changées et l'ensemble a subi une remise en peinture complète. Les remplissages du garde-corps en béton blanc ont retrouvé leur aspect d'origine grâce à une technique innovante de décapage par pression de vapeur saturée.

**MAÎTRE D'OUVRAGE : Grands Magasins Galeries Lafayette**  
**ASSISTANT MAÎTRE D'OUVRAGE : Olivier Chalier Conseil**  
**MAÎTRE D'ŒUVRE : Vpeas (mandataire) et Vilo Bach (architecte)**  
**BET STRUCTURE : Bost Ingénierie** □

## ABSTRACT

### INNOVATIVE TECHNIQUES FOR SAFEGUARDING THE CIVIL ENGINEERING HERITAGE

CHRISTIAN TRIDON, STRES

Companies specialised in structural repair and consolidation work are innovating every day on complex projects. Geotechnical sustainability and restoration of masonry on an historic monument, changing expansion couplings on a viaduct, structural strengthening and repair of appurtenances on a bridge, underwater and onshore work, cliff consolidation by rope-harnessed work, establishing compliance with safety standards in a tunnel, authentic renovation of the facades of a former military base, repair and waterproofing of a commercial parking lot, etc. All these varied projects employ various techniques with reinforced concrete, drainage, reinforcement with carbon fibre fabric, resin, sacrificial anodes, liquid waterproofing systems, etc. □

### TÉCNICAS INNOVADORAS PARA LA PROTECCIÓN DEL PATRIMONIO DE INGENIERÍA CIVIL

CHRISTIAN TRIDON, STRES

Las empresas especializadas en obras de reparación y refuerzo de estructuras innovan a diario en obras complejas. Durabilidad geotécnica y restauración de las mamposterías de un monumento histórico, cambio de las juntas de dilatación de un viaducto, refuerzo estructural y rehabilitación de los equipamientos de un puente, obras subacuáticas y terrestres, refuerzo de barranco mediante trabajo vertical, adaptación de las normas de seguridad del interior de un túnel, rehabilitación idéntica de las fachadas de una antigua base militar, reparación y estanqueidad de un parking comercial, etc. Esta variedad de obras ilustra el uso de diferentes técnicas de hormigón armado, drenaje, refuerzo con tejido de fibra de carbono, resina, ánodos sacrificiales, sistema de estanqueidad líquido, etc. □



1  
 © QUADRIC GROUPE ARTELIA

# REPLACEMENT DU TRONÇON D'UN ARC DU PONT DE L'UNIVERSITÉ SUR LE RHÔNE À LYON

AUTEURS : PASCALE GUICHON, DIRECTRICE DE PROJET, QUADRIC GROUPE ARTELIA - BÉRANGÈRE PISIER, MAÎTRE D'OUVRAGE, RESPONSABLE PATRIMOINE  
 OUVRAGE D'ART MÉTROPOLE DE LYON

SUITE À UN CHOC DE BATEAU SUR UN ARC DE RIVE DU PONT DE L'UNIVERSITÉ SUR LE RHÔNE, LE REMPLACEMENT D'UN TRONÇON DE 12,5 M DE LONGUEUR A DÛ ÊTRE RÉALISÉ. LE GRAND LYON A CONFIE À QUADRIC GROUPE ARTELIA LE DIAGNOSTIC DE L'OUVRAGE ET LA CONCEPTION DE CETTE RÉPARATION. LA MISE EN ŒUVRE D'UN ARC PROVISOIRE A ÉTÉ NÉCESSAIRE AFIN DE PERMETTRE LA DÉPOSE DU TRONÇON ENDOMMAGÉ ET SON REMPLACEMENT PAR UNE STRUCTURE NEUVE. LA LIAISON À L'ARC EXISTANT ET LES TRANSFERTS DE CHARGE DE L'EFFORT DE COMPRESSION ONT CONSTITUÉ UN POINT CLÉ DE LA RÉPARATION.

## CONTEXTE DU PROJET

Dans la matinée du 2 avril 2013, un bateau de plaisance a heurté l'arc aval du pont de l'Université côté rive gauche. Une visite d'expertise a été réalisée dans la journée par le bureau d'études Quadric groupe Artelia afin d'évaluer les dégâts et décider des mesures conservatoires à mettre en œuvre. Il a alors été décidé de neutra-

liser le trottoir Sud qui est porté par les deux arcs de rive et de lancer l'étude des travaux de réparation.

En parallèle, une procédure d'expertise a été initiée afin, d'une part, de permettre au Grand Lyon de se retourner contre les responsables de l'accident et, d'autre part, d'acter la solution de réparation à mettre en œuvre. Le Grand Lyon a confié le diagnostic

**1- Vue générale de l'ouvrage en cours de réparation - 2015/10/26.**

**1- General view of the structure undergoing repair - 2015/10/26.**

de la structure et la conception de la réparation au bureau d'études Quadric groupe Artelia, ainsi que le suivi technique en phase travaux.

Les travaux ont été confiés au groupe Freyssinet/Legrand/Tournaud et se sont déroulés entre le mois de mai et le mois de décembre 2015. La répartition des travaux entre les entreprises est la suivante :



**Freyssinet** : coordination des entreprises, installation de chantier et signalisation, dépose et pose des éléments, transfert de charge ;  
**Legrand** : étude et fabrication arcs provisoire et définitif ;  
**Tournaud** : étude et réalisation de l'estacade.

## DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Le pont de l'Université franchissant le Rhône a été construit en 1903. Il est composé de huit poutres en arc métalliques entretoisées formant trois travées indépendantes.

Les portées sont respectivement de 70,15 m, 77,70 m et 70,15 m.

**2- Zone dégradée - Vue locale - 2013/04/03.**

**3- Zone dégradée - Vue générale - 2013/04/03.**

**4- Vue de l'arc provisoire et de l'estacade - Arc neuf - 2015/10/25.**

**2- Damaged area - Local view - 2013/04/03.**

**3- Damaged area - General view - 2013/04/03.**

**4- View of the temporary arch and the jetty - New arch - 2015/10/25.**

La longueur totale de l'ouvrage métallique est d'environ 218 m entre culées. Le tablier d'une largeur totale de 21,00 m, supporte une chaussée de 11,00 m de largeur roulable et deux trottoirs de 5,00 m. Sur l'ouvrage, la circulation s'effectue à sens unique sur quatre voies de circulation. Tous les assemblages de la structure métallique sont rivetés. Les arcs sont constitués de semelles inférieures et supérieures comportant plusieurs plats âmes en treillis. Les arcs sont entretoisés au droit de chaque montant et sont contreventés horizontalement. Ils reposent sur les piles et les culées par l'intermédiaire de rotules métalliques.

## DIAGNOSTIC DE L'OUVRAGE SUITE AU CHOC

Les dégradations occasionnées par le choc sur la structure métallique de l'arc aval de la travée rive gauche sont les suivantes :

- La dégradation locale de la membrure inférieure de l'arc. La semelle et l'âme de la membrure sont déformées et déchirées. Les cornières constituant les âmes des arcs sont dégrafées (figure 2).
- Une déformation transversale de la semelle inférieure de l'arc accompagnée par du flambement des cornières de l'entretoisement horizontal des arcs et des entretoises entre arcs (figure 3).

Un levé topographique par rayon laser montre que la zone déformée de l'arc de rive se limite à une longueur de 8,20 m dont un tiers est situé vers l'axe de la travée et deux tiers vers la pile de l'ouvrage. Un calcul de la descente de charge de poids propre de l'ouvrage montre que l'arc de rive est soumis à des contraintes relativement faibles sous charge permanente (60 Mpa) pour de l'acier pouvant supporter 180 Mpa (hors risque de flambement).

Vu l'étendue des dégâts locaux occasionnés par le choc, une perte de matière de l'ordre de 50% a été estimée, ce qui provoque une augmentation de contrainte de 30 Mpa soit une contrainte de 90 Mpa dans la zone d'arc impactée. Il a donc été jugé nécessaire de neutraliser la circulation sur le trottoir afin de ne pas augmenter cette contrainte et pour assurer la sécurité des usagers.

L'ouvrage ne pouvant vivre dans cet état et vu la déformation importante de l'arc de rive et des pièces de contreventement situées dans la zone d'impact, ▷





5

© QUADRIC GROUPE ARTELIA

il a été décidé de remplacer un tronçon d'arc de 12,50 m environ de longueur, ainsi que les pièces du contreventement horizontal endommagées.

### ÉTUDES DE RÉPARATION

L'arc étant entièrement soumis à un effort de compression, cette intervention locale nécessite de neutraliser cet effort dans le tronçon endommagé et de le transférer dans le tronçon d'arc neuf. Cette opération doit pouvoir s'effectuer en s'affranchissant des effets des variations thermiques.

Pour cela, soit on annule les charges sollicitant l'arc existant, soit on s'oppose localement à la compression de l'arc. Les études de réparation ont été réalisées en envisageant 3 solutions techniques :

- La première solution consiste à transférer la totalité de la charge permanente dans un arc provisoire amené par voie d'eau et régnant sur la totalité de la longueur de la travée, par vérinage et l'arc provisoire et l'arc existant ;
- La seconde solution consiste, après avoir déchargé au maximum l'ouvrage au droit de trois arcs (démolition du hourdis et des superstructures), à transférer les charges permanentes restantes dans l'arc

de rive vers les arcs adjacents au moyen de poutres transversales situées en extrados de l'ouvrage ;  
 → La troisième solution consiste à transférer, dans la zone endommagée, la compression de l'arc existant vers un tronçon d'arc provisoire par vérinage de l'effort de compression. Le tronçon d'arc provisoire est alors mis en œuvre depuis une estacade provisoire.

La solution choisie in fine est la troisième solution avec transfert de charge vers un arc local.

Cette solution est celle qui présentait les délais de réalisation et le coût les plus faibles, sans nécessiter de neutralisation importante de voies de circulation sur l'ouvrage. Dans tous les cas, la navigation est interdite sous la travée rive gauche pendant les travaux.

### DESCRIPTION DES TRAVAUX TRAVAUX PRÉPARATOIRES - ESTACADE D'ACCÈS

Les travaux commencent par la mise en place d'une estacade provisoire fondée sur pieux qui doivent supporter le

pois de tous les matériaux et matériels de chantier.

L'estacade provisoire est constituée de 6 pieux de diamètre extérieur variable (optimisé d'environ 1 200 mm à 1 600 mm).

Les pieux métalliques sont mis en œuvre par vibrofonçage, dans les sols en place comportant une couche de graviers limoneux (hauteur de la couche neutralisée) surmontant une couche de galets et graviers à matrice sableuse puis molasse de meilleures caractéristiques.



6

© QUADRIC GROUPE ARTELIA

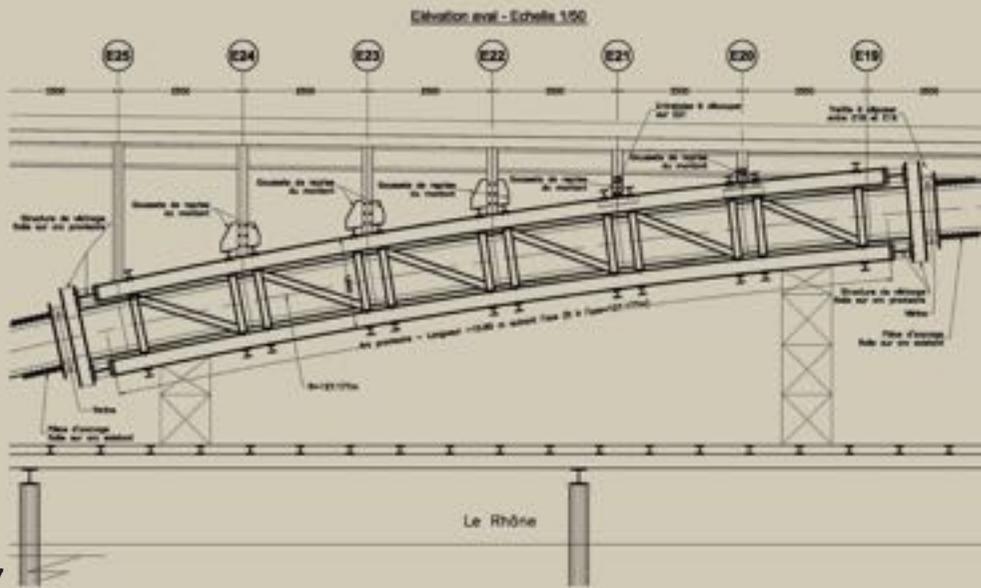
5- Vue de l'arc provisoire et liaisons aux montants - 2015/09/10.

6- Vue du tronçon dégradé de l'arc existant à l'intérieur de l'arc provisoire - 2015/09/10.

5- View of the temporary arch and links to uprights - 2015/09/10.

6- View of the damaged section of the existing arch inside the temporary arch - 2015/09/10.

## PLAN DCE - PRINCIPE DE L'ARC PROVISOIRE



© QUADRIC GROUPE ARTELLIA

Ces pieux sont reliés en tête par 4 chevêtres supportant 5 passerelles sur lesquelles est installé un platelage bois muni de garde-corps. L'estacade présentant une console sous l'ouvrage, la file intérieure travaille en compression et la file extérieure en traction. L'accès à l'estacade est réalisé depuis le tablier. L'estacade est réalisée depuis un ponton flottant.

Les éléments de charpente ont ensuite été grutés depuis le tablier sous restriction ponctuelle de circulation (figure 4).

### TRAVAUX PRÉPARATOIRES - DÉCOUPE DES ÉLÉMENTS POUR MONTAGE DE L'ARC PROVISOIRE

Cette phase comporte la dépose des éléments ornementaux et des éléments du contreventement et des contreventements

#### 7- Plan DCE - Principe de l'arc provisoire.

8a & 8b- Vue de la zone de vérinage entre l'arc existant et l'arc provisoire - 2015/09/23.

#### 7- Tender document drawing - Schematic of the temporary arch.

8a & 8b- View of the jacking area between the existing arch and the temporary arch - 2015/09/23.

ments supérieurs entre arc qui gênent la mise en œuvre de l'arcs provisoire :

- Dépose soignée des ornements de la base des montants et de l'arc de rive ;
- Dépose des poutres treillis supérieures transversales entre les files E18 et E20 avec calage provisoire des traverses intermédiaires.

### MONTAGE DE L'ARC PROVISOIRE

Les travaux débutent par la mise en place de tours d'étalement permettant de soutenir les morceaux de l'arc provisoire lors de son montage.

L'arc provisoire est ensuite mis en œuvre autour de l'arc existant. L'arc réalisé in fine est constitué de deux poutres latérales de type PRS constituées de H, puis assemblées entre elles

par boulonnage HR à l'aide de profilés transversaux.

L'arc provisoire a une longueur d'environ 15 m (figures 5, 6 et 7).

### MONTAGE DES STRUCTURES DE VÉRINAGE ET DE TRANSFERT DE CHARGE

Ces travaux consistent à mettre en place les structures d'appui entre l'arc provisoire, l'arc de rive et les montants d'appui.

Les structures de vérinage, présentes à chaque extrémité de l'arc provisoire, sont constituées de :

- Une pièce de transfert de charge constituée d'une semelle venant se fixer sur les semelles de l'arc existant et de plats verticaux ;
- Un bâti assemblé à l'about de l'arc provisoire.

Les vérins qui serviront aux transferts de charge viennent alors se loger entre les deux.

Par ailleurs, les goussets de reprise des montants des files E20 à E24, présents en partie supérieure de l'arc provisoire, sont assemblés à la structure existante. Les assemblages sont réalisés à l'aide de boulons HR par remplacement un à un des rivets de l'arc de rive.

L'ensemble des assemblages est vérifié avant de passer à l'étape de mise en charge de l'arc provisoire (figures 8a, 8b et 9).

### MISE EN CHARGE DE L'ARC PROVISOIRE

Cette opération consiste à transférer, dans la zone endommagée, la compression de l'arc existant vers le tronçon d'arc provisoire par vérinage de l'effort de compression.

L'effort de compression est d'environ 300 t. ▷



© QUADRIC GROUPE ARTELLIA



Le vérinage est effectué à l'aide de 8 vérins de 100 t de capacité, soit 4 vérins par extrémité.

Un contrôle en effort et en déplacement est réalisé tout au long de l'opération de transfert de charge de l'arc existant vers l'arc provisoire. Le transfert de charge Assisté par Ordinateur (LAO) permet un mouvement synchronisé de l'ensemble des vérins et assure de façon uniforme le mouvement.

9 capteurs de déplacements sont suivis ; 4 par extrémité de l'arc provisoire et 1 au centre de l'arc provisoire pour mesurer la flèche.

Le travail est réalisé en équipression jusqu'à la valeur souhaitée.

Le raccourcissement théorique attendu de l'arc est de l'ordre de 6 mm, soit environ 3 mm à chaque extrémité à la fin du transfert.

Par ailleurs, la déformation verticale de l'arc est quasiment nulle, du fait que

la déformation de l'arc vers le haut sous l'effort de compression est compensée par la déformation de l'arc vers le bas sous la descente de charge du tablier récupérée par la mise en compression des montants.

Un contrôle complémentaire de déplacement est réalisé en cours de mise en charge à l'aide d'un régleur métallique gradué, afin de mesurer la distance entre le châssis de transfert du côté de l'arc provisoire et la semelle de transfert du côté de l'arc existant. Ces mesures supplémentaires permettent de valider le parfait fonctionnement des capteurs de déplacements.

Cette opération de transfert de charge s'est passée conformément à ce qui était attendu. Il n'a pas été noté d'anomalie en cours de transfert.

Au terme du transfert de charge, les vérins sont bloqués sur écrous de sécurité.

## DÉPOSE DU TRONÇON D'ARC ENDOMMAGÉ

La dépose du tronçon de l'arc endommagé est réalisée en plusieurs étapes. La première étape consiste en la dépose des éléments liés à l'arc de rive dans la zone des travaux :

→ Dépose du contreventement vertical et des goussets des files E20 à E24 ;

→ Dépose des contreventements horizontaux inférieurs entre E19 et E25 ;

→ Dépose de la semelle inférieure et des diagonales extérieures de l'entretoise de renfort entre file E20 et E21 ;

→ Dépose des goussets et des cornières d'assemblage des montants verticaux sur l'arc de rive.

À l'issue de cette première étape, le tronçon endommagé n'est plus lié au tablier.

La deuxième étape consiste en la dépose du tronçon :

→ Mise en place des dispositifs de levage et de manutention ;

→ Découpe du tronçon d'arc de rive maintenu par les dispositifs de levage ;

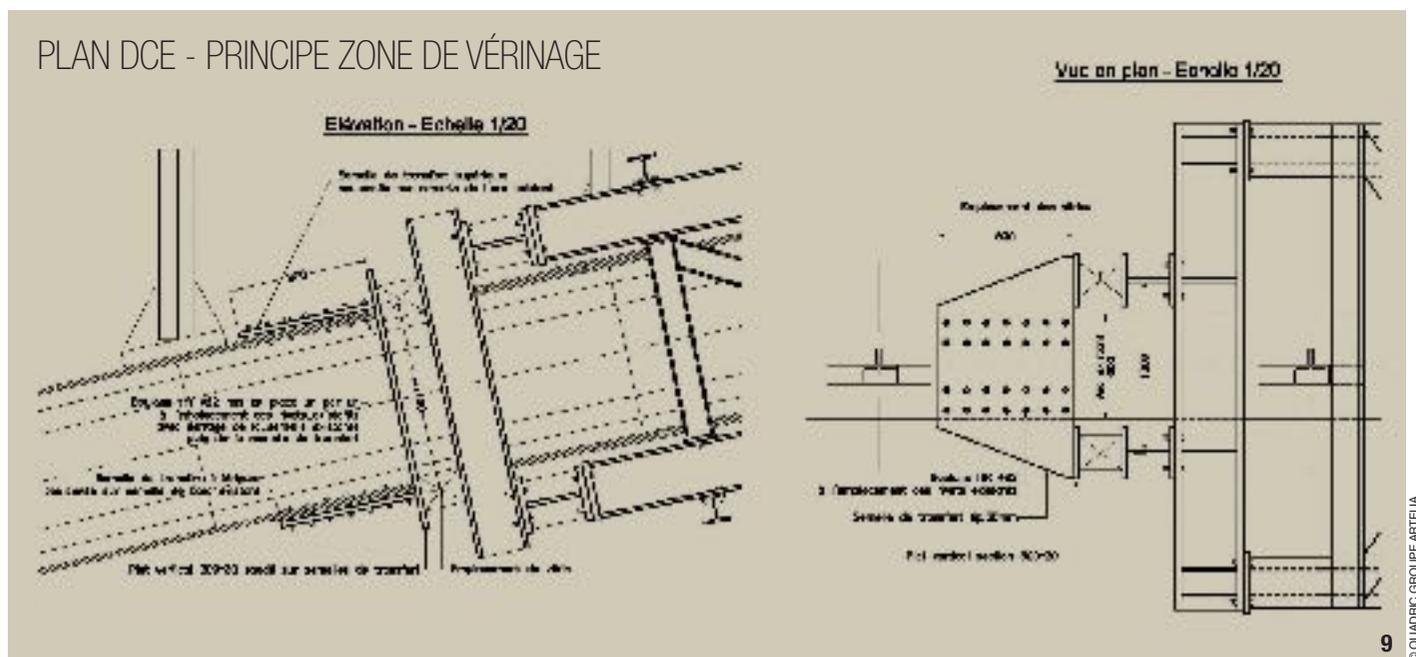
### 9- Plan DCE - Principe zone de vérinage.

### 10- Plan DCE - Principe cinématique du remplacement de l'arc.

### 9- Tender document drawing - Schematic of jacking area.

### 10- Tender document drawing - Schematic kinematic drawing of arch replacement.

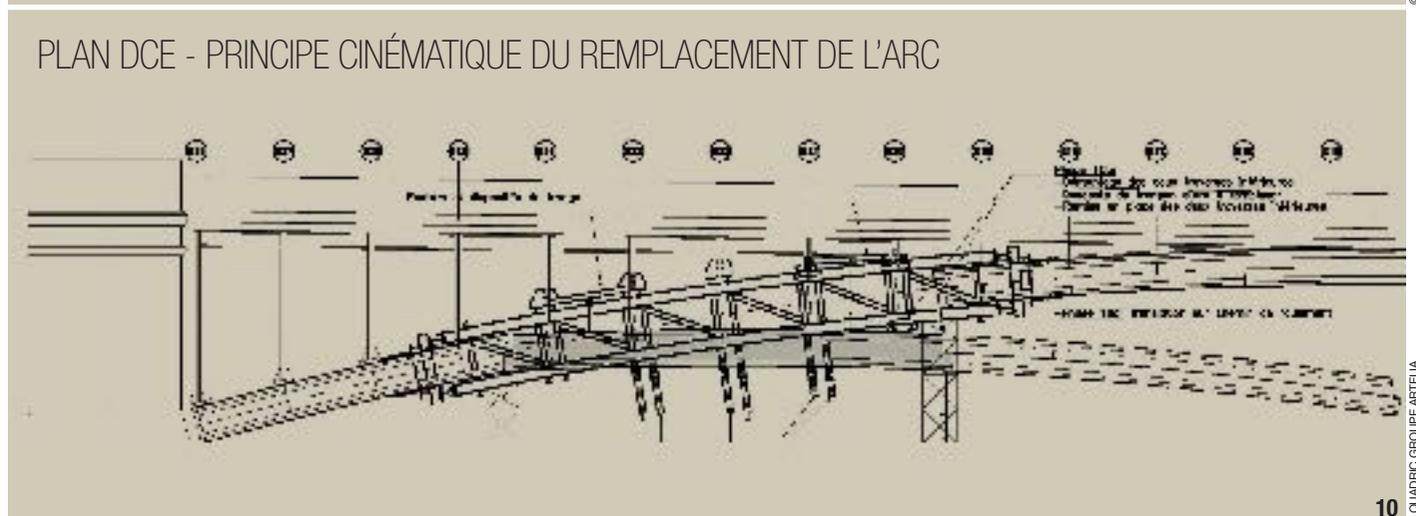
## PLAN DCE - PRINCIPE ZONE DE VÉRINAGE



9

© QUADRIC GROUPE ARTELIA

## PLAN DCE - PRINCIPE CINÉMATIQUE DU REMPLACEMENT DE L'ARC



10

© QUADRIC GROUPE ARTELIA



© QUADRIC GROUPE ARTELIA

11

→ Descente du tronçon d'arc sur les dispositifs de roulement et évacuation.

À l'issue de cette deuxième étape, le tronçon endommagé n'est plus lié à l'arc existant.

La découpe en extrémité du tronçon endommagé est une étape qui a été réalisée sous surveillance particulière en s'assurant qu'aucune anomalie n'était détectée.

Cette découpe a été réalisée au chalumeau (figure 10).

#### MISE EN PLACE DU TRONÇON D'ARC NEUF ET DÉVÉRINAGE

La mise en place du tronçon d'arc neuf s'effectue de manière inverse à la dépose du tronçon endommagé.

Le tronçon neuf est éclissé sur l'arc existant et les montants E20 à E24 sont fixés.

Les éléments de contreventement sont fixés au fur et à mesure, avant ou après l'évacuation de l'arc provisoire selon leur position.

L'assemblage du nouveau tronçon d'arc avec l'arc existant est réalisé à l'aide de boulons HR injectés afin de limiter les déplacements (figure 11).

Après vérification des assemblages le transfert de charge est réalisé.

Le dévérinage est effectué selon une opération similaire à celle du vérinage, en suivant les efforts dans les vérins et les déplacements.

**11- Vue du raccordement entre l'arc d'origine et le tronçon neuf - 2015/10/26.**

**11- View of connection between the original arch and the new section - 2015/10/26.**

La chute de la pression dans les vérins est effectuée par paliers, en réalisant des contrôles similaires à ceux effectués lors du vérinage.

L'opération de dévérinage s'est effectuée sans anomalie.

À noter que l'arc provisoire tel qu'il a été réalisé par l'entreprise a conduit à simplifier la cinématique proposée au DCE, en évitant des modifications des éléments transversaux en cours de travaux de dépose du tronçon endommagé et de pose du nouveau tronçon.

#### DÉPOSE DE L'ARC PROVISOIRE - FINITIONS

Après relâchement des vérins, le tronçon d'arc neuf reprend les efforts de compression de l'arc de rive.

Les goussets de reprise des efforts des montants verticaux présents sur l'arc provisoire sont alors démontés, puis l'arc provisoire est démonté et évacué.

Les retouches de peinture sont ensuite effectuées après mise en œuvre de l'ensemble des contreventements.

#### DÉMONTAGE DE L'ESTACADE

L'estacade est ensuite démontée et les pieux sont retirés par vibrofonçage depuis un ponton flottant. □

### PRINCIPALES QUANTITÉS

- Remplacement d'un arc métallique de 12,5 m de longueur d'environ 13 t
- Mise en œuvre d'un arc provisoire de 15 m de longueur et d'environ 15 t d'acier
- Transfert de charge d'environ 300 t entre les arcs

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Grand Lyon

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Grand Lyon service Voirie / Vmog / Ouvrages d'Art

**ASSISTANCE TECHNIQUE MOE ÉTUDES ET TRAVAUX :** Quadric groupe Artelia

**CONTRÔLE EXTÉRIEUR CHARPENTE MÉTALLIQUE :** loa

**ENTREPRISES TRAVAUX :** Freyssinet / Legrand / Tournaud

#### ABSTRACT

### REPLACEMENT OF AN ARCH SECTION OF THE UNIVERSITY BRIDGE OVER THE RHONE IN LYON

PASCALE GUICHON, QUADRIC GROUPE ARTELIA - BÉRANGÈRE PISIER, MÉTROPOLÉ DE LYON

**To repair the University Bridge over the Rhône in Lyon, on which an end arch was damaged after being impacted by a boat, a temporary arch 15 m long had to be set up. The work area was accessed by means of a jetty on the Rhône, consisting of a bracket-mounted decking fastened to vibropiled steel piles. The temporary arch was set up around the existing arch, then assembled using prestressed bolts. Transfer of the load of 300 tonnes, from the damaged section to the temporary arch, and then from the temporary arch to the new section, was performed by synchronising all the jacks and monitoring movements at the level of the end sections and at mid-span. □**

### SUSTITUCIÓN DEL TRAMO DE UN ARCO DEL PUENTE DE LA UNIVERSIDAD SOBRE EL RÓDANO, EN LYÓN

PASCALE GUICHON, QUADRIC GROUPE ARTELIA - BÉRANGÈRE PISIER, MÉTROPOLÉ DE LYON

**La rehabilitación del puente de la Universidad sobre el Ródano, en Lyon, uno de cuyos arcos de margen resultó dañado por el impacto de un barco, ha requerido la instalación de un arco provisional de 15 m de longitud. El acceso a la zona de las obras se ha realizado mediante una estacada sobre el Ródano, formada por un enrejado en ménsula fijado a pilotes metálicos vibro-hincados. El arco provisional se ha instalado alrededor del arco existente, y seguidamente se ha ensamblado mediante pernos pretensados. La transferencia de carga de 300 t del tramo dañado al arco provisional, y seguidamente del arco provisional al tramo nuevo, se ha llevado a cabo sincronizando el conjunto de los cilindros hidráulicos y controlando los desplazamientos en los extremos y en el centro de la luz. □**

# STATION F À PARIS 13<sup>e</sup> - LE PLUS GRAND INCUBATEUR DE STARTUP AU MONDE DANS LE MONUMENT HISTORIQUE HALLE FREYSSINET

AUTEURS : MONA FOULADI RAD, RESPONSABLE DE MISSIONS, ARTELIA VILLE & TRANSPORT - CHRISTIAN HELOU, DIRECTEUR DU PÔLE OUVRAGES SPÉCIAUX ET SOUTERRAINS, ARTELIA VILLE & TRANSPORT - DAVID CHAMBRE, DIRECTEUR DE PROJET, CICAD - NICOLAS DECLOQUEMENT, RESPONSABLE DE PROJET, CICAD

DANS LE 13<sup>e</sup> ARRONDISSEMENT, AU CŒUR DU QUARTIER PARIS RIVE GAUCHE, POUR LE COMPTE DE XAVIER NIEL ET DE LA SEMAPA, LES TRAVAUX DE RESTRUCTURATION DU BÂTIMENT HALLE FREYSSINET ET DES AMÉNAGEMENTS PUBLICS DES ABORDS ONT ÉTÉ ACHEVÉS APRÈS DEUX ANS ET DEMI DE TRAVAUX SOUS LA MAÎTRISE D'ŒUVRE DU GROUPEMENT COMPOSÉ DE ARTELIA/DICILA PAYSAGE/MOM POUR LA PARTIE AMÉNAGEMENTS PUBLICS ET CICAD/INGEROP POUR LE BÂTIMENT. L'OUVERTURE DES ESPACES A EU LIEU DÉBUT JUILLET 2017.



© PHOTO THÈQUE ARTELIA

Le projet de restructuration de l'ancienne Halle Freyssinet et l'aménagement de ses abords s'inscrit dans l'opération de Zone d'Aménagement Concerté (ZAC) « Paris Rive gauche » dans le 13<sup>e</sup> arrondissement de Paris, en rive gauche de la Seine,

et plus particulièrement dans le projet global d'aménagement du secteur Tolbiac-Chevaleret.

Construite dans les années 1920, la Halle Freyssinet était un bâtiment ferroviaire abritant jusqu'en 2006 les messageries de la gare d'Austerlitz avant

**1 - Station F.**

**1 - Station F.**

de tomber dans l'abandon jusqu'en 2012 où elle est classée à l'inventaire des Monuments Historiques.

En 2013, la Ville de Paris, par l'intermédiaire de la Semapa aménageur de la ZAC Paris Rive Gauche, use de son droit de préemption pour acheter



© NIKOLA KRTOLOVA  
2

le bâtiment à la SNCF et le revend à Xavier Niel qui souhaite en faire « le plus grand incubateur du monde » baptisé à l'époque « 1 000 startups » entièrement dédiées au monde numérique, sur plus de 30 000 m<sup>2</sup> (figure 1). La rénovation du bâtiment est confiée à l'architecte Jean-Michel Wilmotte. Le suivi de l'exécution et le pilotage des travaux sont assurés par Cicad/Ingerop. La Ville de Paris, par l'intermédiaire de

**2- Aménagement fini.**  
**3- Complexe d'isolation et étanchéité sur les voûtes.**

**2- Finished development.**  
**3- Built-up insulation and waterproofing on the roofs.**

son aménageur la Semapa, prend en charge les aménagements des abords du bâtiment.

Le site a un statut particulier du fait du décaissé qu'il présente depuis la promenade plantée, point haut correspondant à l'aménagement des couvertures de voies ferrées jusqu'au boulevard Vincent Auriol, seul accès au site de plain-pied. Il est au centre d'une spirale de diverses perspectives mais reste un

édifice isolé qui nécessite d'être relié à la ville par de nombreuses circulations verticales qu'il a fallu traiter harmonieusement.

Le quartier de la Halle Freyssinet est aménagé avec une rue bordée de commerces et ouverte le long de la façade Sud, reliant la rue du Chevaleret et le boulevard Vincent Auriol. À l'ouest, un parvis permet d'accéder à la halle, ainsi qu'à environ 200 logements et à des commerces (figure 2). Il est relié à l'avenue de France par un escalier et une place. Deux passages piétons ouverts au public et transversaux à la halle mettront en relation la rue située au sud de la halle et la promenade plantée. Le projet est enfin complété par la création d'une cour jardinée ouverte sur un restaurant à l'est de la halle et connectée à la rue Alphonse Boudard et à la rue du Chevaleret par un escalier et une rampe.

## LE BÂTIMENT L'HISTOIRE DU BÂTIMENT

La halle de messagerie de fret a été conçue par Eugène Freyssinet et construite entre 1927 et 1929 le long des voies ferrées connectées à la gare d'Austerlitz.

La halle comprend trois nefs et des auvents de part et d'autre. La partie centrale de la nef Nord qui longe les voies ferrées a été surélevée pour pouvoir y installer des bureaux. Cinq voies ferrées étaient installées dans la halle. ▷



© WILLIAM BAYOL  
3

Elle a une longueur totale de 310 m. Eugène Freyssinet a choisi une structure d'une extrême légèreté en adoptant des voûtes cylindriques minces de 7 cm d'épaisseur pour les trois nefs éclairées par des lanterneaux et supportées par des poteaux placés tous les 10,25 m dans le sens longitudinal. Les portées des voiles sont les suivantes :

- Nef Sud (côté arrivée) : 16,20 m ;
- Nef centrale : 25 m ;
- Nef Nord (côté départ) : 18 m.

Les auvents côté Sud ont une portée de 8,30 m et une épaisseur de 6 cm. La structure se décompose en travées marquées par les hautes piles à inertie variable, avec des sections qui s'affinent en partie haute. Le tout forme des portiques qui sont reliés à la toiture et assurent le rôle de traverse haute et composée de voûtes minces. Les poussées des voûtes sont reprises par des tirants placés au droit des poteaux. Ils sont horizontaux pour ceux des nefs et inclinés pour la reprise des efforts des auvents.

La halle est découpée en plusieurs blocs par des joints de dilatation transversaux. Ces joints de dilatation ne sont pas filants sur toute la hauteur de la structure mais uniquement sur la hauteur de la toiture (voûte et poutre-chéneau) et sur une partie des poteaux. Un système de joint diapason à partir d'une hauteur de 5,80 m a été mis en œuvre sur les poteaux concernés. Cette disposition constructive permet à la toiture,



4

© WILLIAM BAYOL

élément le plus exposé aux effets thermiques, de se dilater longitudinalement. La halle a été exploitée par la SNCF jusqu'en 2006. À partir de 2011 un groupe d'événementiel l'exploite pendant une durée de 4 ans. Divers projets sont envisagés sur le site impliquant une démolition totale ou partielle du bâtiment. Le 23 février 2012, le bâtiment est finalement inscrit à l'inventaire des Monuments Historiques.

**4- Atelier de désamiantage des voûtes.**

**5- Création de plancher supplémentaire.**

**4- Roof asbestos removal workshop.**

**5- Creation of an additional floor.**

#### LA CONCEPTION DU PROJET D'INCUBATEUR NUMÉRIQUE ET LA MÉMOIRE DU LIEU

Dès 2013, lorsque Xavier Niel a demandé à Jean-Michel Wilmotte de développer ce projet d'incubateur de startups, la mise en valeur du caractère patrimonial de la halle a été un élément déterminant.

Des mises au point continues avec les architectes des Bâtiments de France



5

© WILLIAM BAYOL

et la Drac, en phase conception et à l'occasion de la présentation des prototypes, ont permis de valider les différents aspects :

- L'occupation des volumes (avec une perspective de la nef centrale laissée totalement libre) ;
- Les choix des techniques employées et des matériaux mis en œuvre, par exemple la membrane d'étanchéité déployée sur l'ensemble des voûtes dans un coloris proche du béton historique (figure 3) ;
- La mémoire ferroviaire du lieu, avec une galerie à ciel ouvert destinée à recevoir les casiers, en lieu et place des voies ferrées.

### LA MISE EN ŒUVRE DE TECHNIQUES SPÉCIFIQUES

Avant de développer les travaux propres au projet de réhabilitation et de construction des nouveaux volumes de la Halle Freyssinet, des opérations majeures ont été entreprises pour assurer la pérennité de la structure historique.

#### La réfection des bétons anciens

La Halle Freyssinet a fait l'objet d'une exploitation industrielle pendant plus de 80 ans. À ce titre la structure existante, et en particulier les sous faces des voûtes, ont été exposées durablement à la pollution.

La principale tâche de la restauration des bétons anciens a donc consisté en une dépollution très fine des surfaces. L'épaisseur des voûtes des trois nefs qui constituent la Halle Freyssinet étant très faible (à peine 6 cm dans les endroits les plus critiques), il fallait donc recourir à la technique la moins invasive possible sur la structure pour décaper les surfaces.

Le cabinet 2bdm, architecte patrimoine de l'opération, a retenu le nettoyage par cryogénie, qui consiste en la projection pneumatique de billes de glace



6  
© WILLIAM BAYOL

#### 6- Renforcement des fondations existantes.

7a- État initial.

7b- État final.

#### 6- Strengthening of the existing foundations.

7a- Initial state.

7b- Final state.

carbonique (entre -70 et -80°C) sur la surface à traiter. La technique tire son efficacité de trois phénomènes :

- L'impact : effet mécanique dû au choc des billes sur la pièce.
- Choc thermique : exposés au froid extrême, les résidus se fragilisent et se rétractent ; une fracture se crée sous l'effet du froid.
- L'effet de souffle : créé par la sublimation de la glace carbonique (augmentation du volume par 500) et qui décolle le résidu.

### Le désamiantage complet des voûtes

Les voûtes et les joints des verrières existantes de la halle avaient été recouverts d'un enduit bitumineux amianté qu'il était devenu nécessaire de retirer. Ce chantier de désamiantage, hors norme par sa surface et la complexité des confinements à mettre en œuvre, a duré plus de 14 mois et s'est déroulé en parallèle des travaux TCE selon un phasage très précis (figure 4).

Une technique d'hydrogommage maîtrisée a été retenue, toujours dans un souci de limiter la perte de matière au niveau des voûtes déjà très fines.

### Le renforcement des fondations

Le projet de réaménagement de la Halle Freyssinet consiste à quasiment doubler la surface de plancher (de 18 000 m<sup>2</sup> initialement à 34 000 m<sup>2</sup>). Des niveaux de planchers partiels ont été créés sous les deux nefs latérales. Les planchers ont été réalisés en charpente métallique moisée dans les éléments porteurs en béton existants (figure 5).

L'ensemble de structure rapportée a généré des charges supplémentaires sur les fondations du bâtiment.

Face à la complexité de justifier, dans le contexte normatif actuel, les fondations existantes en pieux battus réalisées à l'époque d'Eugène Freyssinet, il a été décidé de procéder au renforcement des fondations de chacun des 120 poteaux de la halle. Un système de deux micropieux de part et d'autre de chaque poteau a été réalisé et liaisonné par une nouvelle semelle rendue solidaire du poteau (figure 6).

Un système de vérins assurait l'étape de transfert de charge du poteau vers le nouveau système de fondation.

Durant ces opérations, comme au cours de tous les travaux en infrastructure à proximité des éléments de fondation existants, une méthode observationnelle a été mise en œuvre. ▶

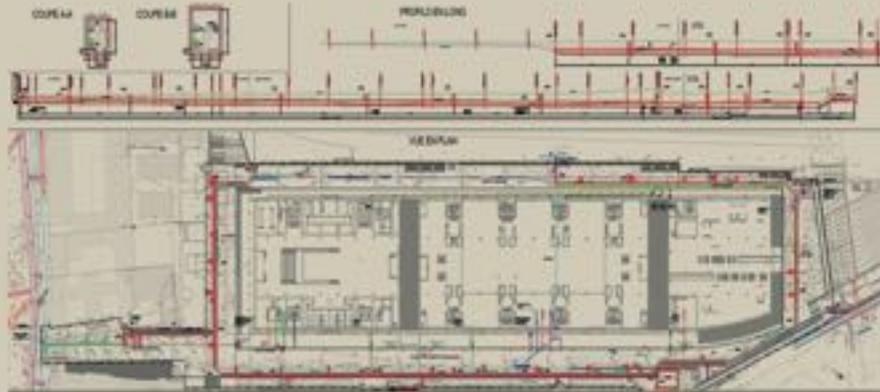


7a



7b

## PLAN D'ASSAINISSEMENT DE 900 m



8

© PHOTO THÉQUE ARTELIA

Elle consistait, à l'aide de théodolites programmés et de cibles installées sur les poteaux, à détecter les mouvements anormaux de la structure existante en X, Y, Z.

### L'ORGANISATION DES TRAVAUX

Chacune des typologies d'intervention citées plus haut correspond à autant de chantiers isolés à organiser dans la halle. Un phasage détaillé a dû être établi et suivi quotidiennement. Une interface fine et régulière a également été nécessaire pour organiser les travaux du bâtiment avec ceux des espaces publics.

### LES ESPACES PUBLICS UN PHASAGE COMPLEXE DÙ À LA SITUATION PARTICULIÈRE DU SITE

Entre 2015 et 2017, le site a connu une très forte co-activité entre les travaux liés à la rénovation du bâtiment, les travaux d'aménagement qui sont détaillés ci-dessous, la réalisation des infrastructures des réseaux concessionnaires et les travaux de construction de la couverture au-dessus des voies ferrées.

Au-delà de la densité des travaux, leur complexité a également compliqué le phasage de réalisation, qu'il s'agisse des travaux de la Halle Freyssinet, de la réalisation des ouvrages de couverture ou des travaux d'espaces publics, en particulier d'assainissement avec des tranchées de 6 m de profondeur dans des espaces se rétrécissant parfois jusqu'à 6 m de large.

Le site présente par ailleurs la particularité d'être situé dans un décaissé dans lequel l'ensemble des travaux est accessible par une voirie unique, elle-

même en travaux et débouchant sur le boulevard Vincent Auriol. S'ajoute à cette difficulté majeure d'un site quasiment enclavé (entre les voies ferrées au nord, le bâtiment du Minefi au sud et la rue Alphonse Boudard à l'est), le fait qu'il n'est pas possible d'effectuer des demi-tours sur les voies bordant le bâtiment par manque d'espace et que les seules possibilités de retournement pour sortir du site sont de contourner complètement le bâtiment ou bien d'aménager des aires de retournement à l'intérieur du bâtiment. Le phasage des travaux des aménagements des abords de la halle a donc été très complexe et a nécessité des ajustements constants et un suivi hebdomadaire pour maintenir à tout moment un acheminement des hommes et du matériel.

### LA CONSISTANCE DES TRAVAUX D'AMÉNAGEMENT

#### Le terrassement

La construction du réseau d'assainissement, des voiries et des ouvrages a

**8- Plan d'assainissement de 900 m.**

**9- Les tranchées de blindage pour les galeries techniques.**

**8- 900-metre drainage level.**

**9- Lagging trenches for the main services ducts.**



9

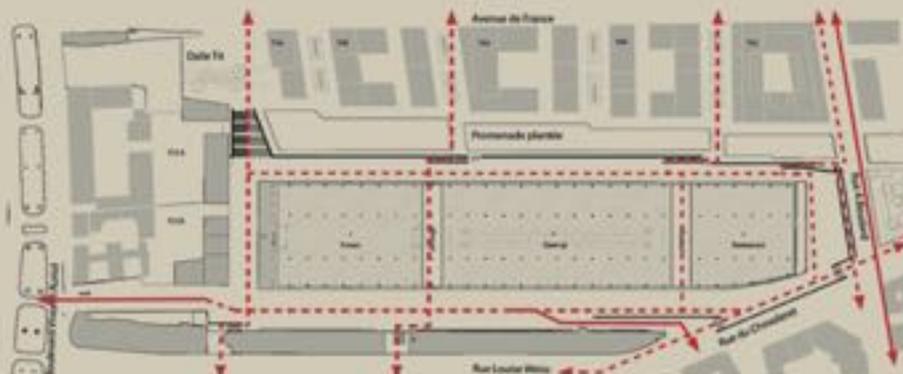
© PHOTO THÉQUE ARTELIA

produit près de 19 000 m<sup>3</sup> de terres de terrassement dont 13 000 m<sup>3</sup> ont été évacués en décharge.

Une partie de ces terres n'étant pas propre à une évacuation en filière pour terres inertes (ISDI), le choix de différents exutoires a été minutieusement fait par le groupement d'entreprises

en charge des travaux, afin d'optimiser les coûts d'évacuation et de réduire les incidences environnementales telles que la circulation des camions et le traitement des terres. Pour ce faire, 6 000 m<sup>3</sup> de terres ont pu être stockées, traitées et réutilisées sur site comme remblais (figures 7).

## PLAN DE CIRCULATION



© PHOTO THÉQUE ARTELIA

10

## VUE D'ENSEMBLE DU PROJET

### Les cinq lieux

Le Passage (Avenue) 1600m<sup>2</sup>

Le Parvis 1100m<sup>2</sup>

Le Cours Freyssinet (Esplanade) 4400m<sup>2</sup>

La Cour Jardinée 182m<sup>2</sup>

Le Jardin linéaire (Douve) 3225m<sup>2</sup>



© PHOTO THÉQUE ARTELIA

11

### Les ouvrages d'assainissement

La présence de la nappe phréatique à quelques mètres à peine sous le niveau du terrain naturel rend impossible les infiltrations mêmes locales.

Il a donc été décidé de traiter les eaux par le système d'assainissement parisien.

Afin de réduire l'impact environnemental, la Semapa a choisi de réaliser le réseau d'assainissement en collecteur séparatif et visitable, de le raccorder au système de réseau séparatif du quartier et de créer une station relevage pour assurer la connexion au collecteur existant de la rue du Chevaleret.

### 10- Plan de circulation.

### 11- Vue d'ensemble du projet.

### 10- Traffic plan.

### 11- Overall view of the project.

Le collecteur d'assainissement est donc réalisé tout autour de la halle avec 900 m de galeries en béton armé enterrées, construites en tranchée blindée entre 3 m et 7 m de profondeur sous la chaussée et d'une section intérieure variant de 1,4 m à 2,5 m en largeur et de 2,2 m à 2,5 m en hauteur (figures 8 et 9). En particulier, les travaux du collecteur à 7 m de profondeur et à proximité immédiate du mur de soutènement en pierre meulière de la rue du Chevaleret a nécessité une vigilance particulière.

La particularité du site fait que les eaux pluviales et les eaux usées de l'ensemble des dalles de couverture des voies ferrées entre la rue Alphonse Boudard et le boulevard Vincent Auriol se rejettent dans ce collecteur en complément des eaux de la halle et de ses abords, soit environ 6,2 ha.

Ce collecteur sert également à l'acheminement de l'eau potable pour les besoins des bâtiments et pour l'alimentation du réseau incendie.

Le collecteur ainsi créé trouve son point bas à l'angle du bâtiment Minefi et de la rue du Chevaleret. C'est à cet endroit qu'il est choisi d'implanter la station de pompage permettant de relever les

effluents (eaux pluviales et eaux usées) de 6 m vers le collecteur de la rue du Chevaleret. Cette station de relevage, enterrée de 12 m de profondeur est constituée d'une paroi périmétrique de type pieux sécants permettant de travailler à sec lors du terrassement.

### Les accès au site

La configuration du site précédemment évoquée nécessite la réalisation de véritables ouvrages de génie civil pour garantir les accès et relier le site aux voiries environnantes.

Dans le cadre du projet, quatre liaisons verticales ont été réalisées, deux accès sur la rue Louise Weiss, un accès sur la rue du Chevaleret et un accès sur la rue Alphonse Boudard.

En particulier, l'une des liaisons avec la rue Louise Weiss traverse le bâtiment du Minefi ce qui a nécessité quelques travaux de reprise de la structure du bâtiment, en particulier de la démolition soignée de dalles pour l'intégration d'un escalier (figure 10).

En complément de ces accès, il est prévu trois autres accès (liaisons verticales) vers la future dalle de couverture des voies ferrées.

### L'aménagement du site

L'ensemble des espaces autour la Halle Freyssinet est classé comme « zone piétonne ».

Les espaces sont divisés en cinq lieux, chacun correspondant à un usage spécifique.

Deux principes spatiaux y coexistent harmonieusement, en proposant des ambiances plus urbaines - le principe des cours - et des ambiances plus paysagères - le principe des jardins.

Une ambiance d'ensemble, agréable aux piétons, se dégage finalement de ces contrastes (figure 11).



12a



12b

© PHOTO THEQUE ARTELIA

Contrainte importante du site, la voie délimitant la halle est toutefois une voie pompiers qui doit permettre l'installation d'une voie échelle nécessaire à la défense de la Halle Freyssinet et des commerces implantés sous le bâtiment du Minefi.

La place Grace Hopper (ex cour jardinée), à l'est du bâtiment et de son restaurant, offre un espace densément planté mais comprenant tout de même une voirie délicatement intégrée.

La rue Eugène Freyssinet (ex cours Freyssinet) se présente comme un grand espace pavé de 300 m de long et de 17 m de large entre la halle et le bâtiment du Minefi, sous lequel se situeront les futurs commerces. Elle est pourvue de bosquets d'arbres dont le pare-terre est traité en pavés enherbés (figures 12).

Le parvis Alan Turing situé devant l'entrée de la Halle Freyssinet est également entièrement traité de façon minérale avec des pavés enherbés au pied des arbres formant des bosquets. Le revêtement vertical en pierre de Buxy, élément identitaire du site, orne

**12a & 12b-  
Aménagement  
de la place  
Grace Hopper et  
de la rue Eugène  
Freyssinet.**

**12a & 12b-  
Development  
of Grace Hopper  
square and Eugène  
Freyssinet  
street.**

les soutènements périphériques à l'est de la halle, le long de la rue du Chevaleret et du pont Boudard.

Pour rappeler le passé ferroviaire du site, l'éclairage est constitué de mâts joints par des câbles caténaux sur lesquels l'éclairage LED est fixé. Cette solution qui a permis d'une part d'optimiser la consommation d'énergie et d'autre part d'obtenir un éclairage uniforme des lieux et de renforcer l'échelle piétonne et l'intimité du lieu. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**16 000 m<sup>2</sup> de surface de planchers supplémentaires**

**7 700 m<sup>2</sup> de pavés et 600 m<sup>2</sup> de dalles en granit**

**1 300 m<sup>2</sup> de pierre de revêtement verticale**

**19 000 m<sup>3</sup> de terres excavées dont 13 000 m<sup>3</sup> évacuées en décharge**

## INTERVENANTS

### MAÎTRES D'OUVRAGE :

Station F (ex Sdecn) et Semapa (Société d'Étude, de Maîtrise d'Ouvrage et d'Aménagement Parisienne)

### MAÎTRES D'ŒUVRE :

Artelia Ville et Transport, sous-traitant technique Epi (MOE Général) et Cicad / Ingerop (MOE DET Bâtiment)

**ARCHITECTES :** Wilmotte et Associés - Mom - 2bdm

**PAYSAGISTE :** D'ici La

**OPC GÉNÉRAL :** Artelia Ville et Transport

### ENTREPRISES :

Eiffage Tp (Libération des emprises) - Rabot Dutilleul (Gros œuvre) - Freyssinet (Réfection des bétons) - Razel / Segex / Centralepose (Aménagements) - Valentin Tp (station de relevage)

## ABSTRACT

### STATION F IN PARIS 13<sup>e</sup> - THE BIGGEST START-UP INCUBATOR IN THE WORLD IN THE HISTORIC HALLE FREYSSINET MONUMENT

MONA FOULADI RAD, ARTELIA VILLE & TRANSPORT - CHRISTIAN HELOU, ARTELIA VILLE & TRANSPORT - DAVID CHAMBRE, CICAD - NICOLAS DECLOQUEMENT, CICAD

**The transformation of the Halle Freyssinet building into Station F, the biggest start-up incubator in the world, required substantial organisation and motivation of all the stakeholders to take on the challenge of opening Station F in July 2017. In a dense urban environment, constrained by a single site access for a large number of operations carried out simultaneously and interfacing closely, the work involved not only renovating the building but also transforming the surrounds into a pleasant, integrated, continuous and open location. Without disrupting the environment, the transparent building facade fits in with the public areas and successfully meets the challenge of creating a new district dedicated to the digital economy, with its confidential aspect and its openness to the outside world. □**

### STATION F DE PARÍS, DISTRITO 13 LA MAYOR INCUBADORA DE STARTUPS DEL MUNDO EN EL MONUMENTO HISTÓRICO HALLE FREYSSINET

MONA FOULADI RAD, ARTELIA VILLE & TRANSPORT - CHRISTIAN HELOU, ARTELIA VILLE & TRANSPORT - DAVID CHAMBRE, CICAD - NICOLAS DECLOQUEMENT, CICAD

**La transformación del edificio Halle Freyssinet en la Station F, la mayor incubadora de startups del mundo, ha precisado una amplia organización y la movilización de todos los actores para superar el desafío de inaugurar la Station F en julio de 2017. En un entorno urbano denso, limitado por un acceso único al recinto para llevar a cabo multitud de operaciones de forma simultánea y fuertemente interrelacionadas, las obras han consistido, por una parte, en rehabilitar el edificio y, por otra, en transformar los alrededores en un lugar agradable, unificado, continuo y abierto. Sin romper con el entorno, la fachada transparente del edificio acompaña los espacios públicos y logra el objetivo de crear un nuevo barrio dedicado al sector digital, con una zona privada y otra abierta al exterior. □**



**PRO BTP,  
LE MEILLEUR DE LA  
PROTECTION SOCIALE**

SANTÉ  
PRÉVOYANCE  
RETRAITE  
ÉPARGNE  
ASSURANCES  
ACTION SOCIALE  
VACANCES

**PRO BTP**  
GROUPE



# PRÉSERVONS L'AVENIR



**Protection de la Promenade des  
Anglais contre les intrusions de  
véhicules.**

Dans un contexte difficile lié à un risque élevé d'attaques terroristes dans des lieux fréquentés, tels que les aéroports, les écoles, les hôpitaux, les lieux touristiques et les lieux de concentration des foules, le groupe Maccaferri a développé un dispositif de protection contre les intrusions de véhicules.

MacSafe™ a été conçu pour garantir la sécurité des usagers en s'intégrant discrètement dans le paysage. Il peut facilement être démonté quand le niveau d'alerte diminue.

Nice, Alpes-Maritimes  
MacSafe™ 1 km

**MACCAFERRI**

[www.maccaferri.com/fr](http://www.maccaferri.com/fr)