

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

OUVRAGES D'ART. VIADUC DE FRANCHISSEMENT DU GIFFRE A MARIGNIER (74). GRAND PONT DE THOUARE-SUR-LOIRE. TROISIEME TABLIER DU VIADUC DE GUERVILLE. TABLIERS DU VIADUC DE RENNES. PONT DE SIDI MAAROUF A CASABLANCA. OUVRAGES D'ART DE LA LGV CNM. EXTENSION DE LA LIGNE C DU TRAMWAY DE BORDEAUX. ECOPONT DES ADRETS-DE-L'ESTEREL SUR L'A8. CONTOURNEMENT DE BEYNAC (24). VIADUC DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL A LA REUNION

N°940 MARS 2018



VIADUC (NRL) À LA
RÉUNION : LANCEUR
© SÉBASTIEN MARCHAL

**LES TRAVAUX
PUBLICS** FEDÉRATION
NATIONALE

Vivre le progrès.



Venez nous rencontrer à :

Intermat 2018

Paris, du 23 au 28 avril
Stand: E6 B 056



Les bouteurs Liebherr se distinguent par les qualités suivantes :

- Des moteurs performants et des systèmes de transmission hydrostatiques en continu
- Une consommation modérée grâce au régime moteur constant et au mode éco
- Un poste de travail extrêmement confortable pour un travail productif

Liebherr-France SAS
2, Avenue Joseph Rey, B.P. 90287
68005 Colmar Cedex
Tel. : +33 3 89 21 30 30
E-mail : info.lfr@liebherr.com
www.facebook.com/LiebherrConstruction
www.liebherr.com

LIEBHERR

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
Pierre Aristaghes (Bouygues tp), Erica Calatizzo (Systra), Jean-Bernard Datry (Setec tpi), Philippe Gotteland (Fnfp), Jean-Christophe Goux-Reverchon (Fnfp), 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),
Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente
Com et Com
Service Abonnement TRAVAUX
Bât. Copernic - 20 av. Edouard 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

Directeur de clientèle
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04
b.cosson@rive-media.fr

Site internet : 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

L'AFGC PROMOTRICE DU GÉNIE CIVIL FRANÇAIS À L'INTERNATIONAL



© DR

Dans son éditorial du dernier numéro de Travaux consacré aux ouvrages d'art, Michel Virlogeux évoquait « la disparition du Ministère de l'Équipement » comme étant une des raisons du recul des positions françaises à l'international, et appelait à nous « appuyer sur la technique pour former et valoriser des ingénieurs capables de gagner des affaires par leur compétence, leur créativité et leur réputation. »

L'Association Française de Génie Civil (AFGC) peut aider à relever ce défi car c'est une société savante qui se veut être un lieu privilégié de rencontres et d'échanges entre tous les acteurs du Génie Civil (ingénieurs, techniciens, architectes, enseignants ou étudiants), qu'ils soient donneurs d'ordre, concepteurs, réalisateurs ou chercheurs. Elle a pour objectif de rapprocher le monde des matériaux de celui des structures, ainsi que le monde de l'enseignement et de la recherche de celui de la conception et de la réalisation, et de valoriser l'image du Génie Civil auprès des jeunes.

L'AFGC, via son comité scientifique et technique, organise des conférences et des débats, et impulse des états de l'art dans des domaines nouveaux ou sur des sujets innovants comme le bon usage des éléments finis, les armatures en matériaux composites, la résistance des structures aux impacts et aux explosions, l'impression 3D, etc. Avec ses visites de chantier organisées par ses délégations régionales, elle favorise les échanges de connaissances sur le terrain comme, par exemple, lors du voyage d'étude effectué en novembre 2017 à La Réunion pour découvrir les moyens imposants et la haute technicité

mis en œuvre pour construire ce qui sera le plus long pont de France : le viaduc (long de 5,4 km) de la Nouvelle Route du Littoral.

Mais ce que je souhaiterais mettre en avant, c'est la récente création du Comité des Affaires Internationales qui a pour objectif de promouvoir et de coordonner la présence française dans les associations internationales avec lesquelles nous sommes en relation (IABSE, fib, RILEM, ACI)⁽¹⁾. Cette présence se traduit par l'intégration de Français dans les groupes de travail, par la participation active aux symposiums et congrès, et par la publication d'articles dans les revues de ces grandes associations.

Récemment, en octobre 2017, l'AFGC a organisé à Montpellier son troisième symposium international sur le thème "Concevoir et Construire avec les Bétons Fibrés Ultra Performants", domaine dans lequel la France a une avance certaine par rapports aux autres pays. Plus de 300 participants de 29 pays y ont assisté, plus une centaine d'étudiants issus des écoles d'ingénieurs locales. Ce fut l'occasion de promouvoir les normes françaises nouvellement émises sur les BFUP ainsi que la performance architecturale et structurelle unique du BFUP lors des visites des façades du quartier "La Mantilla", du pont de La République et de la superbe toiture de la nouvelle gare TGV de Montpellier.

Pour 2018, l'AFGC supervise la publication d'un numéro spécial de la revue "Structural Engineering International" de l'IABSE qui sera consacré à des réalisations françaises en cours et comportera quelques articles de scientifiques français.

Le point d'orgue en 2018 sera le 40^e symposium de IABSE⁽²⁾ organisé par l'AFGC à Nantes du 19 au 21 septembre, 30 ans après avoir organisé le symposium IABSE en 1987 à Versailles !

Alors oui, l'AFGC est un vecteur de promotion collective du Génie Civil Français à l'international et toutes les bonnes volontés sont appelées à la rejoindre, pourvu que les sociétés dans lesquelles elles travaillent leur en laissent le temps.

1 - IABSE : International Association for Bridge and Structural Engineering.
fib : fédération internationale du béton.

RILEM : Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages.
ACI : American Concrete Institute.

2 - www.iabse.org/Nantes2018.

BRUNO GODART
PRÉSIDENT DE L'AFGC

OUVRAGES D'**ART**

IMAGINER
CONCEVOIR
CONSTRUIRE

ÉCOPONT DES ADRETS-DE-L'ESTÈREL SUR L'A8 © MATIERE





16

**ENTRETIEN AVEC
BENOÎT LE THIERRY D'ENNEQUIN
ET YVES PAGÈS**

EXPLORATIONS ARCHITECTURE :
MAÎTRISER LA TECHNIQUE POUR REVENDIQUER
LA FORCE DU DESSIN

**22 LATITUDE DRONE : L'AIR ET L'EAU POUR
ESPACE D'INSPECTION ET DE MODÉLISATION 3D**



28

**VIADUC DE FRANCHISSEMENT
DU GIFFRE**
à Marignier (74)



36

**LE RENOUVEAU
DU GRAND PONT
DE THOUARÉ-SUR-LOIRE**



44

**TROISIÈME TABLIER
DU VIADUC DE GUERVILLE**



52

**LA POSE DES TABLIERS
DU VIADUC DE RENNES**



58

**LE PONT
DE SIDI MAÂROUF**
à Casablanca



64

**LES OUVRAGES D'ART
DE LA LGV CNM**



74

**EXTENSION DE LA LIGNE C
DU TRAMWAY DE BORDEAUX**
Ouvrage de franchissement
de la rocade



80

**CONCEPTION-RÉALISATION
DE L'ÉCOPONT
DES ADRETS-DE-L'ESTÉREL**
sur l'autoroute A8



88

**CONTOURNEMENT
DE BEYNAC (24)**
Conception des deux ouvrages d'art
de franchissement de la Dordogne



94

**VIADUC DE LA NOUVELLE ROUTE
DU LITTORAL (NRL) À LA RÉUNION**
Préfabrication du tablier



100

**VIADUC DE LA NOUVELLE ROUTE
DU LITTORAL (NRL) À LA RÉUNION**
Le lanceur



106

**VIADUC DE LA NOUVELLE ROUTE
DU LITTORAL (NRL) À LA RÉUNION**
Préfabrication des 48 piles et assemblage
des Méga VSP







SUR LE VIADUC DE RENNES ON NE REND PAS SON TABLIER, ON LE LANCE

RAZEL-BEC et **EIFFAGE** ont construit cet élégant viaduc courbe de 2395 m, dont le tablier est constitué de 973 voussoirs nervurés préfabriqués précontraints en deux tabliers indépendants reposant sur 70 piles. La pose a été effectuée avec une poutre de lancement de 550 t pourvue de nombreuses adaptations tenant compte notamment des caractéristiques géométriques extrêmes de cet ouvrage urbain de la ligne b du métro de Rennes.

(Voir article page 52).



10 PROPOSITIONS POUR DÉVELOPPER L'ÉNERGIE ÉOLIENNE



Éoliennes de 2 à 3 MW en fonctionnement depuis fin 2017 à Saint-Étienne-de-Lugdarès (Ardèche), pour la commune.

© ENERCON GMBH

L'énergie électrique fournie par le vent devra passer de 11 700 MW de puissance disponible (2016) à 15 000 en 2018, et se situer entre 21 800 et 26 000 en 2023. Ces hausses accompagnent la baisse de la part du nucléaire dans la production d'électricité (72,3% en 2016), la fin de la recherche et de l'exploitation des hydrocarbures en France⁽¹⁾ et la montée en puissance de toutes les énergies renouvelables dont l'hydraulique : elles représenteront 32% de la consommation finale d'énergie en 2030 et 40% de la production électrique. Des objectifs précis seront inscrits dans la programmation pluriannuelle de l'énergie 2018-2023, en cours d'élaboration⁽²⁾. Un groupe de travail sur l'éolien, réuni fin 2017, a inspiré dix propositions pour

le développer, publiées par Sébastien Lecornu, secrétaire d'État à la transition écologique, le 17 janvier. Elles contribuent à raccourcir les délais et à simplifier les procédures.

→ Remplacer les machines existantes

Les projets d'éoliennes s'étalent sur sept à neuf ans en France à cause des procès, contre trois-quatre ans en Allemagne, ce qui en grève le coût. Pour y remédier, le groupe de travail propose que les recours aillent directement devant la cour administrative d'appel au lieu de passer par le tribunal administratif (propositions n°1 et 2). Jusqu'à présent, le remplacement d'éoliennes, au même endroit, par des modèles plus puissants s'assimilait à du

neuf avec nouvelle autorisation. « *La profession estime à environ 5 GW la puissance installée éolienne qui pourrait être gagnée à l'horizon 2030* » par ce biais (n°3). Désormais, c'est l'importance de la modification qui entraînera ou non une autorisation.

En ce qui concerne les avis conformes de la Direction générale de l'aviation civile - perturbation des radars par les turbines - ils sont limités à un rayon de 16 km ; avis simple au-delà (n°4). Le raccordement de la production d'électricité au réseau est simplifié. La vérification de la conformité technique par l'administration au stade du projet est supprimée (n°5). Plusieurs dispositions visent à apaiser le climat autour des éoliennes. La nuit, elles

seront éclairées en continu au lieu de clignoter. C'est la 1^{re} gêne évoquée par les riverains, avant l'aspect visuel de jour et le bruit (n°6). Afin d'améliorer les études d'impact sur le paysage, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie financera l'assistance à maîtrise d'ouvrage (n°7).

→ 20% de l'Ifcr au moins pour les communes

Les communes pourraient recevoir une part plus élevée de l'imposition forfaitaire sur les entreprises de réseau (l'Ifcr), avec un minimum de 20%, afin de les inciter à accueillir des éoliennes sur leur territoire (n°8). L'Ifcr, qui représente 7 400 euros/MW installé (2017), est répartie entre département, établissement public de coopération intercommunale et commune. Les projets sont mieux acceptés, également, quand les habitants participent au financement (n°10).

Enfin, un guide de bonnes pratiques entre développeur et collectivité locale sera rédigé afin que les projets se déroulent plus sereinement : démarches, informations à communiquer, pratiques à éviter. Un réseau de conseillers techniques sera constitué pour les communes rurales (n°9). ■

⁽¹⁾ Loi n°2017-1839 du 30 décembre 2017.

⁽²⁾ Cf. *Travaux* novembre n°937, novembre 2017, page 7.

LES ENGINES DE CHANTIER REMONTENT LA PENTE

Le monde des engins de chantier souffre. « *Conjoncture favorable, atmosphère positive* », résume Jean-Marie Osdoit, président du Syndicat des entreprises internationales de matériels de travaux publics, mines et carrières, bâtiment et levage-manutention (Seimat). L'année 2017 a été meilleure que prévue, notamment la 2^e moitié. Le Syndicat avait annoncé +11%⁽¹⁾. La réalité, c'est +19%, tous matériels confondus, à plus de 50 000 engins vendus.

→ Plus de connectivité

2018 restera au même niveau de vente, avec une progression de 4 à 8%. « *Nous nous attendons à un haut de cycle en 2019-2020*, entrevoit M. Osdoit. *Le développement des métropoles et des villes soutient le secteur. Les machines connaîtront des évolutions technologiques en connectivité et en motorisation,*

conformément aux attentes des clients. » L'année dernière a été positive pour les engins de chantier dans le monde entier, sauf au Brésil, et ça continuera en 2018, Chine en tête avec +10-20%.

→ Croissance pas trop rapide

La France connaît une croissance « *pas trop rapide* », selon le Seimat, ce qui arrange les industriels qui doivent livrer les commandes.

La mesure de sur-amortissement mise en place par le Président de la République en 2015-2017 n'a pas provoqué « *d'explosion* » du marché. Elle aura des effets jusqu'en 2019. Les travaux publics (+2,5 à +4% en 2018) et le bâtiment ont renoué avec la croissance.

En terrassement, le gros matériel progresse de 16%. Les pelles sur chenilles de plus de 12 tonnes restent plus fréquentes en France que dans les pays du

nord de l'Europe qui préfèrent celles sur pneus, et les utilisateurs les bichonnent. Les pelles sur pneus, de plus de 11 tonnes, augmentent (+25%) mais sont presque trois fois moins nombreuses à être vendues.

Les matériels compacts (tonnages inférieurs) ont connu une hausse de 22% en

2017 (près de 17 000 machines). Les mini pelles sont toujours en vedette à près de 9 400 unités.

Les opérations comme le Grand Paris Express et les chantiers urbains vont soutenir ces ventes. ■

⁽¹⁾ Cf. *Travaux* n°937, novembre 2017, page 8.

FORTE HAUSSE EN 2017

Famille de matériel	Évolution 2017/2016 en nombre	Prévisions 2018
Terrassement	+16%	+9%
Compact	+22%	+4%
Routier	+21%	+1%
Béton	+46%	+3%
Levage	+12%	+6%
Total	+19% 50214 unités	+4,1% à +8%

SOURCE : SEIMAT



demathieu bard

Osez entreprendre, autrement!



demathieu-bard.fr



TROIS PASSERELLES OCCUPÉES

Le concours international *Reinventing Cities* de la ville de Paris propose sept sites dont trois où construire des passerelles occupées par des activités culturelles et de loisirs. Les candidats ont jusqu'au 20 avril pour remettre leur proposition. Résultat : début 2019.

INTERCONNEXION RENFORCÉE

L'interconnexion entre les réseaux électriques français et espagnols va passer, en 2025, de 2 800 MW à 5 000 grâce à une liaison de 370 km entre Cubnezais (Gironde) et Gatika (Biscaye, pays basque espagnol).

En janvier, la Commission européenne s'est engagée à verser une subvention de 578 millions d'euros sur le 1,75 milliard d'investissement.

DÉPLOYER LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Après de longs mois de négociation, un nouveau modèle national de contrat de concession pour la distribution publique d'électricité a été signé entre la Fédération nationale des collectivités concédantes et régies, France urbaine, Enedis et EDF.

Ce contrat maintient les notions de solidarité et de péréquation propres au service public tout en ménageant une marge d'adaptation au contexte local. Objectif : déployer la transition énergétique dans les territoires.



© OLIVIER ULRICH/ENEDIS

Les concessions de distribution d'électricité font l'objet d'un nouveau contrat.

QUEL RÉGIME POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT D'ICI À 2037 ?



© VICTOR THOMAS POUR MORLAIX COMMUNAUTÉ

Les pôles d'échanges multimodaux sont une priorité. Ici, celui autour de la gare de Morlaix (Finistère), terminé en septembre 2017.

Les dépenses pour les infrastructures de transport ont du mal à entrer dans les limites que l'État impose. Ainsi, des trois scénarios proposés dans le rapport du Conseil d'orientation des infrastructures (COI) fin janvier, le plus maigre dépasse la loi de finances 2018 et n'est pas suffisant pour répondre à l'urgence. Ces scénarios à vingt ans (2037) doivent aider le gouvernement à rédiger une loi d'orientation (avril) dont le parlement débattera ensuite. Le projet comprend deux volets : la mobilité au

quotidien et l'entretien des réseaux. Le rapport du COI complète les assises de la mobilité menée par Élisabeth Borne, ministre des transports, au dernier trimestre 2017⁽¹⁾. Il répond à la demande d'une « vision solide, financièrement réaliste, et en adéquation avec les enjeux économiques et sociaux du pays ». Ce travail « réalisé dans l'urgence » selon Philippe Duron, président du Conseil⁽²⁾, s'appuie sur le rapport Mobilité 21 (juin 2013) et se concentre sur les projets les plus matures. Il est limité aux infrastruc-

tures de l'État ou cofinancées par lui. Les très grands projets comme la ligne ferroviaire Lyon-Turin, le Canal Seine Nord Europe, le Grand Paris Express, ont été exclus de cette réflexion.

→ Plus de transport à la demande

Les propositions devaient répondre aux besoins d'entretien, de désenclavement, de lutte contre les bouchons, de réduction des inégalités territoriales (villes moyennes et Outre-Mer) et d'un fret plus performant. Les liaisons entre métropoles seront fluidifiées en résorbant les nœuds ferroviaires.

Le transport à la demande (TAD en taxis, minibus) sera développé. Les voies ferrées les moins circulées pourraient être désaffectées et dédiées à des véhicules autonomes en TAD.

→ Trains à hydrogène

La voiture sera abandonnée pour les petits trajets au profit du vélo et des transports en commun "propres" dont l'utilisation sera facilitée par les pôles multimodaux. Les nouvelles lignes de train pourraient fonctionner avec des motrices à hydrogène, moins chères en infrastructures que les électriques.

À budget annuel restreint, étalement des dépenses. Les grands projets seront étalés sur plusieurs années.

Rapport de 207 pages sur www.ecologique-solidaire.gouv.fr, 1^{er} février. ■

⁽¹⁾ Cf. *Travaux* octobre 2017, n°936, page 8.

⁽²⁾ Composé de 16 membres d'horizons différents et dont Bruno Cavagné, président de la FNTP, est vice-président.

TROIS SCÉNARIOS

Rapprocher les besoins de transport des moyens financiers, être utile au plus grand nombre, investir plus et mieux : ces directives du ministère des Transports ont guidé le Conseil d'orientation des infrastructures pour dresser trois scénarios sur vingt ans.

Le complément de financement viendrait de quelques centimes de plus sur la taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques, d'une moindre compensation sur les prix du carburant accordée au transport routier et aux taxis, d'une vignette sur les camions et les véhicules utilitaires légers.

Scénario n°1 : environ 2,4 milliards d'euros par an pour l'Agence de financement des infrastructures de transport de France (Afitf), soit 48 milliards en vingt ans. Six milliards sont déjà dus pour l'en cours. Jugé insuffisant par le conseil pour restaurer le patrimoine et traiter les nœuds ferroviaires. Grands projets - lignes Provence-Côte-d'Azur, Paris Normandie, etc. - achevés en 2050.

Scénario n°2 : avec 60 milliards dédiés à l'Afitf, les objectifs sont atteints. Grands projets en phase 1. Mobilité au quotidien élevée.

Scénario n°3 : avec 80 milliards d'euros, l'Afitf répond mieux aux attentes des territoires mais ces dépenses excèdent le cadre budgétaire actuel.

RETOUR AU POSITIF DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

La reprise de l'activité de production des matériaux de construction s'est confirmée en 2017, selon les données publiées par l'Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction (Unicem) en janvier. Celle de granulats, redressée en 2016 par rapport à 2015 mais encore en recul à -1,1% à l'époque, redevient positive à +3,1%⁽¹⁾. Celle du béton prêt à l'emploi (BPE), déjà en meilleure santé en 2016 à +3,2%, s'améliore de 6,5%.

Rappelons que les granulats sont destinés à 80% à des ouvrages de génie civil et de voirie et réseaux divers, tandis que le BPE part à 80% dans le bâtiment. L'ensemble des matériaux de construction incluant ceux dont la production est beaucoup moins importante - ciment, produits en béton, tuiles et briques - voit son activité augmenter de 4,8% en 2017. Seules les tuiles reculent, de 4,4%.

En 2018, l'Unicem prévoit une hausse de 3,5% dans les granulats et 4% pour le BPE. Le produit intérieur pourrait progresser comme en 2017 à 1,7%. Les travaux publics bénéficieront de la fin du cycle électoral avec réanimation de la commande publique, et des grands chantiers.

→ Diviser par deux la mise en décharge

L'organisation professionnelle note toutefois une tension sur l'acheminement



Carrière de calcaire Eqiom de Bayel (Aube) dotée d'une voie de chemin de fer.

des matériaux, en particulier dans les régions concernées par le Grand Paris Express. Elle demande aux pouvoirs publics d'anticiper les enjeux de fret et de logistique urbaine. L'Unicem participe à trois ateliers de la feuille de route du

gouvernement sur l'économie circulaire. Elle réfléchit notamment aux moyens de diviser par deux la mise en décharge d'ici à 2025. ■

⁽¹⁾ Données corrigées des jours ouvrés.

LA REPRISE DE 2016 SE CONFIRME

Évolution annuelle	Granulats (tonnes)	Béton prêt à l'emploi (m ³)
2015/2014	-6,2%	-6,7%
2016/2015	-1,1%	+3,2%
2017/2016	+3,1%	+6,5%
2018/2017 (prévisions)	+3,5%	+4%

SOURCE: UNICEM/FFFB/SFC

GÉRER LES MILIEUX AQUATIQUES EN PARTENARIAT

Dix collectivités territoriales ont signé un partenariat avec le Cerema⁽¹⁾ et l'Irstea⁽²⁾ afin de mettre en place la compétence Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations, transférée aux communes et à leurs groupements depuis le 1^{er} janvier (loi n°2014-58). Le partenariat vise à analyser les situations locales particulières et à rechercher des solutions partageables au niveau national.

Parmi les collectivités retenues dans le 1^{er} appel à partenaires, citons l'agglomération de Saint-Malo (Ille-et-Vilaine) qui se préoccupe de la fiabilité de ses ouvrages d'endiguement. Troyes Champagne Métropole (Aube), de son côté, analyse les digues qui la protègent des inonda-

tions par les bassins versants de la Seine supérieure, de la Vanne et de l'Aube.

→ Retour sur les chantiers de protection

L'agglomération de Puy-en-Velay (Haute-Loire, 73 communes) se prépare à hériter de la digue de Brives-Charensac de l'État. Elle veut aussi sortir les eaux de pluie du réseau.

Le Syndicat mixte de gestion intercommunautaire du Buëch et de ses affluents (Hautes-Alpes, Drôme, Alpes-de-Haute-Provence) travaille sur l'érosion et les sorties de lit, et sur les retours d'expériences de ses chantiers de protection de berges.

Le Syndicat du bassin de la Bourbre (Isère, 9 EPCI) explore la contribution des

zones humides à la prévention des inondations.

→ Utiliser les eaux usées traitées

Enfin, le Comité du bassin de la Mauldre et de ses affluents (Yvelines, 20 syndicats) se concentre sur les débordements. Il envisage de réutiliser les eaux usées traitées et de cantonner les eaux de pluie à chaque parcelle.

En savoir plus sur : <https://gemapi.cerema.fr/projets-retenus>. ■

⁽¹⁾ Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

⁽²⁾ Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture.

RÉSEAU SITES ET SOLS POLLUÉS

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie a créé Essort, réseau des acteurs des sites et sols pollués.

Buts : transférer les connaissances aux utilisateurs et orienter la recherche.

Par ailleurs, l'Ademe a lancé deux appels à projets Gestion intégrée des sites pollués en 2017. Lauréats connus en mars.

<https://appelsprojets.ademe.fr/aap/GESIPOL2017-34-2>

ÉNERGIES RENOUVELABLES ET RÉSEAUX INTELLIGENTS

Le Syndicat des énergies renouvelables et l'association Think Smartgrids ont signé un partenariat en décembre pour créer une offre conjointe énergies renouvelables et réseaux intelligents.

Il s'agit de développer ce couple à l'export et en France.

ASSURER LE PARTAGE ENTRE TPE

L'assureur MMA inclut les dommages aux matériels et aux locaux en cas de "prêt" entre entreprises. Cela suite à son étude auprès de gérants de très petites entreprises.

Dans le BTP, un entrepreneur sur dix emprunte à l'extérieur, outils et équipements surtout. Ces échanges créent des liens, permettent des économies et de la flexibilité dans l'activité. Les interviewés évoquent toutefois le manque de ressources à partager, de temps pour s'en occuper et la nécessité d'une confiance réciproque.



© ATLAS COPCO

Les entrepreneurs partagent outils et équipements. Ici, mât d'éclairage sur remorque.

BIM NIVEAU 2 POUR BESIX

Le département Engineering de Bexis Contracting (Belgique) a obtenu la certification Bim niveau 2 (degré de collaboration entre acteurs), accordée par BSI Group selon le standard britannique Pas 1192-2.

TUNNEL DE MÉTRO À MELBOURNE

Bouygues Construction fait partie du consortium qui va réaliser en partenariat public privé un tunnel de 9 km pour le métro de Melbourne (Australie). À ses côtés dans le Cross Yarra Partnership : Lendlease, John Holland et Capella Capital. Contrat de 3,9 milliards d'euros confié par le gouvernement de l'État de Victoria.

Outre le tunnel bitube, le projet comprend 5 stations de métro, l'aménagement de parcs et de zones piétonnes.

Les travaux, commencés début 2018, se terminent en 2026.

MAÎTRISE D'ŒUVRE LYON-TURIN

S2IP a remporté début février la maîtrise d'œuvre des travaux du tunnel de base de la ligne de train Lyon-Turin (Telt, Italie), côté français en Savoie, entre les descenderies de Saint-Martin-de-La-Porte et de La Praz (hameau de Saint-André)*.

S2IP regroupe Setec (mandataire), Systra, Italferr et Pini Swiss Engineers.

* Cf. Travaux n°921, janvier-février 2016, page 8.

EXTENSION DU TRAMWAY DE BORDEAUX

Colas remporte deux contrats de la prolongation de la ligne D du tramway de Bordeaux. Colas Rail en groupement avec Alstom, Colas Sud-Ouest et Fayat TP, pose les voies ferrées et une ligne aérienne de contact, sur 6,2 km.

Colas Sud-Ouest réalise les travaux de remblais, d'assainissement et d'aménagement de surfaces.

L'extension sera mise en service en octobre 2019, après deux ans de chantier.

DEUX PASSERELLES ENTRE MANTES-LA-JOLIE ET LIMAY



© DIETMAR FEICHTINGER ARCHITECTES

Les deux arches centrales du vieux pont seront remplacées par une passerelle métallique.

Piétons et cyclistes passeront confortablement de Mantes-la-Jolie à Limay (Yvelines) grâce à deux passerelles, à partir de 2020. Jusqu'à présent, ils empruntent le grand pont de Mantes, ouvrage en poutres acier et tablier béton des années 1950, sur la départementale D983, ex-route nationale. Les vélos se réfugient sur le trottoir, gênant ceux qui marchent.

La 1^{re} passerelle, de 200 m en acier, s'accroche sur la face sud-est du pont. Elle relie Mantes-la-Jolie à l'île aux Dames sur la Seine. Elle prend appui sur les culées et les piles du pont. Ces dernières sont forées pour y placer tirants et butons de plus de 20 m. Les piétons sont séparés des cyclistes par un petit garde-corps en acier.

Le chantier sur le pont a commencé en 2017 et se termine cet automne. La structure de la passerelle a été assemblée dans le port de Limay et sera acheminée par barge fin mai. Elle a été conçue par Dietmar Feichtinger Architectes (DFA). Montant des travaux : 3,9 millions d'euros HT.

Un chemin sur l'île, lieu de promenade, conduit au vieux pont de Limay⁽¹⁾, décalé un peu en amont.

Datant du XI^e siècle, remanié au fil du temps, il est interdit à la circulation depuis fin XIX^e. Il a été coupé en deux à la Seconde guerre mondiale.

Les deux arches centrales disparues vont être remplacées par une passerelle métallique d'une trentaine de mètres. La restauration des vestiges, monuments

historiques en maçonnerie de pierre, d'environ 110 m sur 5 m de large, a été estimée à 2 millions d'euros HT.

→ Une passerelle "couture"

La passerelle dite "couture" revient à 550 000 euros.

La maîtrise d'ouvrage, élu du Syndicat mixte d'aménagement, de gestion et d'entretien des berges de la Seine et de l'Oise et ceux de l'intercommunalité Grand Paris Seine & Oise (73 communes), ont voulu garder le sens de l'histoire et y associer une structure du XXI^e siècle.

L'architecte en chef des monuments historiques, bureau Manciulescu ACMH et associés, est chargé de la restauration du pont et de sa préparation pour poser la passerelle, conçue aussi par DFA.

→ Rejoindre les nouvelles gares

Le franchissement de la Seine entre Mantes et Limay a été confié à l'Établissement public d'aménagement du Mantois Seine Aval (Epamsa). Il facilitera l'accès aux nouvelles gares de la ligne Éole situées sur Mantes.

Les travaux de la grande passerelle sont réalisés par le groupement Razel Bec (fondations et génie civil) et Viry (charpente métallique). Le marché du vieux pont devrait être attribué en mai. ■

⁽¹⁾ Dit aussi vieux pont de Mantes.

CHANGEMENT DE PONT SUR L'ISÈRE

La traversée de l'Isère entre Saint-Quentin-sur-Isère et Tullins - à une vingtaine de kilomètres à l'ouest de Grenoble (Isère) - a été fluidifiée par le changement de pont.

Le vieux pont de 1930 était trop étroit pour supporter 6 500 véhicules par jour dont près de 5% de poids lourds.

Le nouveau mesure 13 m de large contre 8 pour l'ancien. La chaussée passe de 6 m à 10. L'ouvrage est doté d'un trottoir et de deux bandes cyclables.

→ Tracé modifié

Il s'agit d'un pont mixte avec caisson métallique et hourdis en béton armé, à trois portées de 60 m, deux piles en rivière avec fondations profondes.

Il mesure 190 m de long. Le tracé de la RD45 est modifié à cet endroit. Les travaux s'élèvent à 25,5 millions d'euros

dont 13,5 pour le nouveau pont (Eiffage), le tout financé par le département. Le chantier s'est terminé en novembre

après deux ans et demi de travaux. Fin mai 2018, le vieux pont aura été démolé. ■



Nouveau pont en construction à 50 m de l'ancien pont de 1930.

© DÉPARTEMENT DE L'ISÈRE



**PRO BTP,
LE MEILLEUR DE LA
PROTECTION SOCIALE**

SANTÉ
PRÉVOYANCE
RETRAITE
ÉPARGNE
ASSURANCES
ACTION SOCIALE
VACANCES

PRO BTP
GROUPE

CHAUSSEE CAPTEUR DE CHALEUR

La Power Road (ex-Novatherm) est un système qui capte la chaleur d'une portion de route en été et la restitue en hiver, au même endroit (dénivèlement) ou à proximité (chauffage). Des tubes sont noyés dans la chaussée. Ils transmettent la chaleur à une nappe de tubes horizontale située à 1 m de profondeur, ou à des sondes géothermiques verticales réchauffant le sol autour d'elles.

La première expérimentation a débuté en 2013 sur le site de Vermont TP (filiale d'Eurovia) à Gilley (Doubs). La seconde date de juillet 2017. Elle couvre 500 m² d'un parking poids lourds au péage de Saint-Arnoult-en-Yvelines, sur l'A10 en région parisienne*.

→ Route du futur

La Power Road est un des 4 lauréats de l'appel "route du futur" de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, connus fin 2017. Sont également distingués : Regic, géosynthétique intelligent de renforcement de sol au-dessus d'une cavité potentielle, une route en matériaux recyclés à 100 % et I-Street, solutions pour une meilleure compétitivité du transport par route.

* Partenaires : Ifsttar, CEA Tech, et Burgeap.



© EUROVIA

Pose de tubes capteurs sur un parking à Saint-Arnoult-en-Yvelines (Yvelines).

LE GRAND PONT DE THOUARÉ-SUR-LOIRE RETROUVE SA RÉSISTANCE INITIALE



© PAUL PASCAL DÉPARTEMENT LOIRE ATLANTIQUE

La circulation n'a été fermée que six mois grâce à l'emploi de dalles préfabriquées.

Le Grand pont de Thouaré-sur-Loire, en amont de Nantes (Loire-Atlantique), a été refait pour supporter, de nouveau, les charges des véhicules.

Ce pont métallique, type cage en treillis de 392 m de long par 6 de large, n'avait pas été rénové depuis 1882, hormis l'entretien régulier, alors même qu'il avait été ébranlé lors de la dernière guerre mondiale.

L'ouvrage, emprunté par 10 500 véhicules/jour, était sous surveillance depuis

2014. Le tablier en béton armé n'était plus étanche. Les eaux de pluie percolaient jusqu'aux voûtains en briques supportés par des pièces de pont. La charpente en fer puddlé est constituée de cornières et tôles de petite dimension, rivetées. Les charges routières avaient été limitées à 3,5 tonnes contre 8 tonnes, à l'origine.

→ 220 dalles en BFUP

Le département de Loire-Atlantique a opté pour le remplacement du tablier par

220 dalles en béton fibré ultra performant (BFUP), clavetées sur place.

Elles allègent la charge de 1 500 tonnes. Autre avantage : la circulation sur la RD37 n'était fermée que six mois pour travaux. Enfin, cette solution autorisait l'ajout de deux encorbellements futurs pour les cyclistes et piétons.

Les dalles sont appuyées sur des profilés reconstitués soudés, boulonnés sur les pièces de pont existantes. Leur épaisseur varie de 7 cm en rive à 11,7 cm à l'axe de l'ouvrage afin de reprendre le dévers de la chaussée.

Le Grand pont a été réceptionné en août dernier. Montant des travaux (y compris le Haut village qui suit) : 6 millions d'euros. Voir article dans le présent numéro, page 36.

→ Autre projet à 6 km

Maîtrise d'œuvre : département et Artélia (assistance).

Entreprises : Bouygues Travaux Publics Régions France avec Jousselin (dalles préfabriquées) et Vicat (BFUP).

Le département envisage d'utiliser cette solution sur les ponts de Mauves-sur-Loire, à 6 km au nord-est. ■

TUNNEL MARITIME EN NORVÈGE

Les travaux du tunnel maritime à travers la péninsule de Stad en Norvège vont pouvoir commencer, sauf revers de dernière minute. Le ministre des transports a donné son feu vert en mai 2017, lors de la présentation du plan transports 2018-2029. Le projet, dont ce n'est pas la première version, a été confié à l'agence d'architectes Snohetta avec Nordconsult, par l'administration côtière norvégienne, Kystverket. Il est situé au sud-ouest de Trondheim, aux environs d'Alesund.

L'ouvrage creusé dans une colline de 300 m de haut accueillera de gros navires : cargos (poisson), péniches et bateaux de croisière, jusqu'à 16 000 tonnes de jauge brute (plus de 45 000 m³). Il est prévu de conserver un muret de roche à chaque extrémité du tunnel pour empêcher l'eau d'envahir le chantier.

Jusqu'à présent, le passage d'un fjord à l'autre se "négociait" au large dans une mer difficile (100 jours de tempête par

an). Les courants, la topographie des fonds marins et le vent se combinent pour produire de la houle dans plusieurs directions.

→ 50 m de haut par 36 de large

L'ouvrage rectiligne, qui devrait ouvrir après trois ou quatre ans de chantier à partir de 2019, permet un passage plus sûr mais pas tellement plus rapide.

Il mesure 1,7 km, 50 m de haut dont 33 au-dessus de la mer et 36 de large de paroi à paroi. Il ne fonctionnera que dans

un sens à la fois avec changement toutes les heures.

Une vingtaine de navires pourront l'emprunter par jour mais il est conçu pour une centaine.

L'agence d'architectes-paysagistes norvégienne Snohetta a conçu des entrées où la roche est striée de lignes horizontales parallèles à celles du paysage.

Coût estimé : 295 millions d'euros (sources : AFP, www.kystverket.no/en/, <https://newatlas.com>). ■



© KYSTVERKET/SNOHETTA

Le tunnel fonctionnera dans un sens à la fois.

L'OCCITANIE RÉCOMPENSE LES ACTIONS EN FAVEUR DES INFRASTRUCTURES ET DES RÉSEAUX



© VILLE DE FOIX

Le pôle d'échanges multimodal autour de la gare de Foix (Ariège) a été conçu pour en diminuer l'entretien.

L'Observatoire régional de la qualité de service des infrastructures (Orquasi) d'Occitanie a attribué, pour la deuxième fois, des trophées à sept acteurs locaux pour leurs actions en faveur des infrastructures et des réseaux.

L'Orquasi, créé en 2014 en Midi-Pyrénées, se veut un lieu d'échanges entre collectivités locales, associations de consommateurs, entreprises et Conseil économique, social et environnemental régional (Ceser).

Organisé en quatre collèges dont un d'universitaires et d'experts, il est présidé par Jean-Louis Chauzy du Ceser.

Le trésorier de l'association est Thierry Le Friant de la Fédération régionale des travaux publics.

Fin novembre 2017, 7 dossiers ont été retenus sur 14 nominés et une cinquantaine, reçus.

L'Agence de l'eau Adour-Garonne a été récompensée pour deux appels à projets auprès de collectivités pour réduire les fuites dans les réseaux d'eau potable et d'assainissement.

Trigone, Syndicat mixte du Gers, réalise actuellement une station de production d'eau à Pléhaut (33 communes desservies) qui lui vaut d'être remarqué par l'Orquasi. Mise en service fin 2018, elle disposera d'un réservoir à double cuve de niveau de pression différente comme celle de l'Arros. Coût : 14,45 millions d'euros.

→ Écluses du XVII^e siècle

Béziers Méditerranée (Hérault) a restructuré les abords du site des 9 écluses de Fonseranes, soit 12 hectares, pour en faire un pôle touristique, pédestre et cyclable. Le chapelet d'écluses comprend neuf bassins ovoïdes, dessinés par Pierre-Paul Riquet au XVII^e siècle. Le dispositif permettait de franchir 21,50 m de haut en 312 m. Il est classé au patrimoine mondial de l'Unesco. Fin des travaux : 2017. Coût : plus de 10 millions d'euros.

L'Observatoire a aussi retenu le pôle d'échanges multimodal autour de la gare de Foix (Ariège) conçu pour en diminuer le coût d'entretien. Il est terminé depuis

mars après deux ans de travaux. Il comporte un grand parking (220 places, 280 en 2023), des équipements cyclables, des aménagements piétons et handicapés, deux quais d'autobus, le tout planté autant que possible et avec des sols perméables à la pluie. Coût : 1,7 million d'euros HT payés à 60,5 % par l'État, 21 % par la commune de Foix, 9 % par le département et par la région.

Le contournement du centre-ville de Montauban (Tarn-et-Garonne) comprend un volet environnemental intégrant la dynamique de la biodiversité et des voies pour modes doux de transport. L'agglomération a reçu un trophée.

→ Anticiper l'entretien routier

Le conseil départemental de la Haute-Garonne filme ses chaussées à partir d'un véhicule afin d'anticiper les besoins d'entretien routier, démarche couronnée par l'Observatoire.

Enfin, l'engagement de Gers numérique (syndicat) dans le déploiement des communications à très haut débit a également reçu un trophée de l'Orquasi. ■

CHEMISAGE D'UN ÉMISSAIRE DE 6,4 km

L'émissaire dit du Cap Cicié, de 6,4 km de long et 1,80 m de côté, a été entièrement re-tubé par la Sade. Les travaux ont duré de novembre 2015 au 1^{er} trimestre 2018.

Le collecteur d'eaux usées relie sept communes proches de La Seyne-sur-Mer (Var), à l'ouest de Toulon, et dessert 288 000 habitants. Construit au début des années 1940, il était détérioré.

Le chemisage a nécessité 2724 demi-coques fabriquées sur mesure par Amiblu d'après les préconisations de la Sade avec la technologie Hobas. Il doit durer cinquante ans au moins.

Le réseau se situe à une profondeur de 40 à 105 m.

Quatre puits ont été utilisés dont un pour descendre les demi-coques de 1 500 mm par 1 678 sur 2,35 m de long. Considérant le peu d'espace libre dans ce milieu urbain, 128 demi-coques étaient livrées par semaine, correspondant à 300 m de canalisation.



© SAGE

Pose d'une demi-coque à l'aide d'un chariot.

REVÊTEMENT LUMINESCENT

Vicat a développé un béton composé de granulats photo luminescents qui captent la lumière de jour pour la restituer de nuit.

Stylperf Lumicat s'illumine pendant six heures. Selon le fabricant, il peut prendre le relais de l'éclairage public, ce dernier une fois éteint. Il convient pour baliser des zones ponctuelles comme des pistes cyclables.

LE BIM SOUS L'ANGLE DE LA COOPÉRATION HUMAINE

L'ouvrage *Le Bim éclairé par la recherche* consacre une part importante aux changements que la méthode de travail introduit, à la remise en cause des métiers, à l'activité des équipes projets et à la coopération généralisée. Il est issu de travaux

de recherche en architecture, génie civil, informatique, sciences humaines et sociales.

Régine Teulier de l'Institut interdisciplinaire de l'innovation, une des auteurs, a travaillé sur les conditions et processus de la coopération entre les êtres

humains et les machines, et entre entreprises, à partir des pratiques. Co-auteurs : Sylvain Riss (école d'ingénieurs du Centre des études supérieures industrielles) et Aurélie Talon (Polytech Clermont-Ferrand).

www.editions-eyrolles.com ■



TRANSPORT : RÉUSSIR UN PÔLE D'ÉCHANGES

Ne dites plus pôle intermodal ou multimodal pour désigner un carrefour de transports, dites pôle d'échanges.

Ce terme introduit l'être humain à côté de l'imbrication des lignes de train, de bus et des parkings. La marche est pla-

cée au centre, et la voiture, en périphérie. Ces pôles, qui regroupent plusieurs fonctions dont des commerces, sont un défi en matière d'unité.

Le Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement a fait appel à tous les spécia-

listes dont les représentants d'utilisateurs pour publier *Les pôles d'échanges au service de l'intermodalité et de la ville durable*. L'ouvrage comprend de nombreux exemples de terrain à côté des aspects théoriques fouillés.

www.cerema.fr ■



HISTOIRE, THÉORIE ET PRATIQUE DE LA PIERRE SÈCHE

Louis Cagin, muraillier, a dirigé un ouvrage très complet sur la pierre sèche. Avant la centaine de pages consacrées à la technique et à la mécanique de ces constructions, sont développées l'archéologie et l'histoire de cette technique, son anthropologie, les terrasses,

et sa participation aux paysages. Ont été mis à contribution Ada Acovitsioti-Hameau, anthropologue sociale et culturelle, Marine Bagnérès, spécialiste du comportement mécanique, Romana Harfouche, archéologue, Olivier Hérault, paysagiste, auteur des dessins et sché-

mas, Michel Jean du Laboratoire de mécanique et d'acoustique de Marseille, Denis Lacaille, paysagiste d'aménagement, Jean Laffitte, spécialiste d'architecture vernaculaire et photographe, et Danièle Larcena, géographe.

www.editions-eyrolles.com ■



GUIDES À L'USAGE DES MAÎTRES D'OUVRAGE

Il n'existe pas un type de diagnostic d'un site pollué mais une palette selon le contexte. Le guide *Optimiser le diagnostic sites et sols pollués* propose dix fiches d'aide aux maîtres d'ouvrage pour qu'ils commandent l'étude dont ils ont besoin. Objectif : réduire les surcoûts et les retards dus aux mauvaises surprises. Ce guide a été initié par IDfriches, action de la région Auvergne-Rhône-Alpes portée par le pôle de compétitivité Axelera, le cluster Indura, le pôle de compétences

Cerf et Envirhônalp, avec l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe).

→ **Densité urbaine réelle ou vécue**

L'Ademe, de son côté, vient de publier *Faire la ville dense, durable et désirable* destiné aux élus des collectivités locales. Le document de 65 pages présente les « leviers à mobiliser pour agir sur la densité réelle et la densité vécue. »

En matière de réseaux, les trois guides de la Fédération nationale des collecti-

tivités concédantes et régies (FNCCR), fournissent aux élus et à ceux qui les assistent, les outils pour exercer leurs missions. Le premier concerne l'eau et l'assainissement (120 pages) dont la gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations (Gemapi), compétence des communes et de leurs EPCI depuis le 1^{er} janvier. Le deuxième se concentre sur l'énergie (146 pages) et le troisième, sur le numérique (62 pages).

Enfin, la Mission interministérielle pour la qualité des constructions publiques a décidé de diffuser largement son guide recommandations *Bim et maquette numérique*, fin 2017, après un tirage restreint en 2016.

www.idfriches-auvergnerhonealpes.fr ;

www.ademe.fr ;

www.fnccr.asso.fr/article/guides-de-lelu-2018/ ;

www.miqcp.gouv.fr. ■

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 4 ET 5 AVRIL

Hyvolution (hydrogène énergie)

Lieu : Parc floral Vincennes

(Val-de-Marne)

www.hyvolution-event.com

• 5 AVRIL

Visite du chantier ligne Lyon-Turin

Lieu : Saint-Martin-de-La-Porte

(Savoie)

www.indura.fr

• 16 AU 19 AVRIL

Transport Research Arena

Lieu : Vienne (Autriche)

www.traconference.eu

• 21 AU 26 AVRIL

Congrès tunnels ITA-AITES

Lieu : Dubaï (Émirats Arabes Unis)

www.wtc2018.ae

• 23 AU 28 AVRIL

Intermat et

World of Concrete Europe

Lieu : Paris (Villepinte)

www.intermatconstruction.com

• 25 AU 27 AVRIL

L'ingénierie des pays émergents

Lieu : Kuala Lumpur (Malaisie)

www.iabse.org

• 26 AVRIL

R&D en énergie solaire thermique

Lieu : Valbonne (Alpes-Maritimes)

www.ademe.fr

NOMINATIONS

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE :

Thierry Damerval est nommé PDG de l'Agence nationale de la recherche. Il succède à Michael Matosz.

CAISSE DES DÉPÔTS :

Olivier Sichel devient directeur général adjoint. Virginie Chapron-du Jeu, directrice des finances, dépend désormais directement du directeur général.

Autres nominations :

Jean-Marc Morin, conseiller auprès du directeur général ; Pierre Chevalier, directeur juridique et fiscal du groupe ; Pauline Cornu-Thénard,

directrice déléguée au sein de cette direction.

CANAL SEINE NORD EUROPE :

Laurent Pichard (VNF) entre au conseil de surveillance de la Société du CSNE, en remplacement de Vincent Ship.

CERIB :

Rémi Lannoy prend la responsabilité du nouveau pôle construction numérique et Bim au Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton.

CESER :

Éric Berger a pris la présidence du Conseil économique, social et environnemental régional d'Île-de-France à la suite de Jean-Louis Girodot.

EIFAGE CONSTRUCTION :

Philippe Carrère est nommé directeur régional pour l'Occitanie. Laurent Regnier en prend la direction immobilière.

EQIOM :

Sébastien Yafil prend la direction de la transformation digi-

tales et des solutions constructives, nouvellement créée.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS :

Grégoire Koenig succède à Charlotte Leroy au poste de conseiller chargé des relations avec le Parlement et les élus.

SIMPLIFICATION DES NORMES :

Une mission pour simplifier les normes qui s'appliquent aux collectivités locales a été confiée à Alain Lambert et Jean-Claude Bouldard.

VINCI :

Thierry Mirville est nommé directeur financier adjoint du groupe et Marie Bastard, directrice financière de Vinci concessions.

Paul Maarek succède à Sébastien Morand en tant que PDG d'Escota (Vinci Autoroutes) après en avoir été directeur général. Blaise Rapior, directeur du contrat de concession d'Escota, intègre le comité de direction de Vinci Autoroutes.



Membre du Réseau Congés Intempéries BTP

CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics

Nos missions :

assurer le service des congés payés auprès des salariés des Travaux Publics
procéder au remboursement des indemnités de chômage-intempéries versées par les employeurs de la Profession.

La CNETP regroupe **7 400 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues à près de **270 000 salariés**.

Nos coordonnées :

Par courrier :

31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09

Par Internet : www.cnetp.fr

Par mail : sur www.cnetp.fr, lien [nous contacter](#)

Par téléphone :

pour les entreprises : 01.70.38.07.70

pour les salariés : 01.70.38.07.77

Serveur vocal (24h/24) : 01.70.38.09.00



EXPLORATIONS ARCHITECTURE

MAÎTRISER LA TECHNIQUE POUR REVENDIQUER LA FORCE DU DESSIN

LOIN DE CONSIDÉRER QUE LA FORME EST ISSUE DE LA RÉOLUTION D'ÉQUATIONS STRUCTURELLES ET ÉCONOMIQUES, LES CRÉATEURS D'EXPLORATIONS ARCHITECTURE REFUSENT DE SUBIR LA TECHNIQUE EN TANT QU'ENTRAVE À LA CRÉATIVITÉ ET LA MAÎTRISENT POUR MIEUX REVENDIQUER LA FORCE DU DESSIN, SOURCE DE COMPLEXITÉ ET DE SOLUTIONS INÉDITES. **ENTRETIEN AVEC BENOÎT LE THIERRY D'ENNEQUIN ET YVES PAGÈS, CO-FONDATEURS DE L'AGENCE EXPLORATIONS ARCHITECTURE.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



SANS ENTRER DANS LE DÉTAIL DES RÉFÉRENCES MULTIPLES DONT PEUT ÉVIDEMMENT FAIRE ÉTAT EXPLORATIONS ARCHITECTURE DEPUIS SA CRÉATION PLUS QUE QUINDÉCENNALE, BENOÎT LE THIERRY D'ENNEQUIN ET YVES PAGÈS SE RÉFÈRENT À DES RÉALISATIONS CARACTÉRISTIQUES DES IDÉES FORTES AUTOUR DESQUELLES L'AGENCE A CONSTRUIT SA RÉPUTATION TANT DANS LE DOMAINE DU BÂTIMENT STRICTO SENSU QUE DANS CELUI DES OUVRAGES D'ART, QUELLES QUE SOIENT LEUR TAILLE, LEUR NATURE ET LEUR DESTINATION ET DONT ELLE S'EST FAIT QUASIMENT UNE SPÉCIALITÉ.

Comment l'idée de créer Explorations Architecture est-elle née et avec quel objectif ?

Nous avons créé l'agence Explorations en 2002 en centrant notre travail sur ce qui est l'essence même de l'architecture, sa vocation originelle : construire pour abriter.

Si les ouvrages d'art et plus généralement les infrastructures constituent aujourd'hui un de nos domaines de prédilection, l'agence a débuté son activité, comme toute agence d'architecture « classique », par des constructions dans le domaine du bâtiment. Parce que tout est matière à architec-



FIGURE 1 © LUIS DIAZ - FIGURE 2 © MICHEL DENANCÉ - FIGURE 3 © JACQUES LEONE



© MICHEL DENANCE

4

ture, nous avons cherché d'entrée à dessiner un large spectre de projets : des logements, des musées, des salles de sport, mais aussi des ouvrages plus techniques comme des tours de contrôle ou bien des projets d'accueil du public dans des sites patrimoniaux majeurs comme le Domaine National de Saint-Cloud.

Parmi les réalisations emblématiques à mettre au compte d'Explorations Architecture, quelles sont celles qui vous viennent tout naturellement à l'esprit ?

Le pavillon d'accueil temporaire du Château de Versailles, livré en 2008, constitue l'une des réalisations qui nous a permis de développer une écriture propre dans le cadre d'un environnement patrimonial majeur.

1- De gauche à droite : Yves Pagès et Benoît Le Thierry d'Ennequin, co-fondateurs de l'agence Explorations Architecture.

2- Le pavillon d'accueil temporaire du Château de Versailles.

3- Le pont Schuman sur la Saône à Lyon.

4- Le pont sur l'Oise, de type bow string, à Compiègne.

5- La passerelle de la darse du Millénaire renouée avec la tradition de la couleuvre.

Situé dans la Cour d'honneur du Château, et construit au départ pour une durée de trois ans - le temps nécessaire au réaménagement définitif des espaces d'accueil -, il était doté de toutes les installations techniques nécessaires à un établissement recevant du public mais il proposait aussi une forme architecturale en parfaite adéquation avec le génie du lieu. Pour ce bâtiment, nous avons fait le choix d'un objet à la fois abstrait, sculptural et contemporain mais aussi respectueux du site par une implantation précise et une matérialité soignée. Grâce à sa large entrée prolongée d'un espace intérieur en forme de corne d'abondance, il permettait de gérer élégamment et efficacement un flux très important de visiteurs (près de 5 millions par an).

Si le caractère provisoire de la construction a dicté l'utilisation de matériaux légers, l'exigence de qualité imposait qu'ils s'harmonisent avec l'environnement minéral de la cour. Le pavillon était donc fait d'acier, de verre et de bois non traité qui a grisé avec le temps. Les fondations du pavillon ont été coulées sur un film plastique afin de protéger les pavés de la cour classée, qu'il n'était pas question de déposer. Le choix d'une construction éminemment contemporaine témoignait également de l'ambition portée par le maître d'ouvrage l'Établissement public du Château, du Musée et du Domaine National de Versailles, présidé à l'époque par Jean-Jacques Aillagon, pour faire vivre les lieux patrimoniaux et les rouvrir à la création artistique sous toutes ses formes. ▶

© MICHEL DENANCE

5



Parmi les très nombreux ouvrages d'art à l'actif de votre agence, quels sont ceux qui vous paraissent le plus représentatifs de votre approche ?

Nos réalisations sont très nombreuses dans ce domaine. Le pont Schuman sur la Saône que nous avons livré fin 2014 est sans doute un des plus significatifs : il a d'ailleurs remporté en 2015 le prix du meilleur pont routier décerné par l'Institution of Structural Engineers de Londres.

Sa réalisation fait partie des projets majeurs menés par le Grand Lyon pour accompagner le développement de la métropole et « dessiner pour demain une ville toujours plus facile, plus belle et plus agréable à vivre », selon Gérard Collomb, alors sénateur-maire de Lyon et président de l'agglomération.

Respectant le site sans s'y soumettre, le pont Schuman s'affirme comme une réponse architecturale à ses illustres voisins que sont la passerelle Masaryk et le pont de l'île Barbe, respectivement construits en 1827 et 1830. Il s'agit de deux ouvrages suspendus qui adoptent la même typologie avec une pile centrale.

Le pont Schuman leur répond par une symétrie inversée en élévation : il est constitué de 2 arcs en bow string s'appuyant sur une pile centrale.

Evolution contemporaine des ponts maçonnés en arc, le bow string reporte l'arc au-dessus du tablier de manière à dégager le plus grand tirant d'air, comme l'imposait le gabarit de navigation de la Saône. Dans cette configuration, le tablier n'est plus supporté par l'arc, il y est suspendu. Il sert également de tirant pour reprendre les efforts horizontaux.

Pour ce projet, nous avons concentré nos efforts sur la continuité visuelle de

l'ouvrage, qu'il s'agisse du profil à inertie variable des arcs, de la connexion des arcs à la pile, de l'accroche du tablier sur les rives en pierre, de l'intégration du mobilier ou de l'éclairage, que nous avons voulu rasant et indirect pour mettre en valeur les arches sans pour autant émettre de pollution lumineuse.

Pour cet ouvrage, les ingénieurs et les constructeurs se sont pliés au geste architectural, très élégant mais extrêmement complexe.

L'expérience du pont de Compiègne que nous avons réalisé précédemment nous a beaucoup servi. C'était déjà un bow string très tendu avec une portée similaire de 72 m. Son arc était constitué par un caisson compact avec des tôles de très forte épaisseur.

Malgré des différences notables entre les deux ouvrages, Compiègne nous avait conforté dans les performances des aciers contemporains et surtout dans les compétences très pointues des charpentiers métalliques européens. On notera que sur Schuman la géométrie très complexe des arcs n'a quasiment pas évolué entre le concours et la réalisation⁽¹⁾.

L'agence a également réalisé les passerelles du marché à Maisons-Laffitte et sur la darse du Millénaire à Paris. Quelques mots sur ces ouvrages qui sont devenues des références architecturales dans leur domaine.

Pour la passerelle sur la darse du Millénaire, en bordure du canal Saint-Denis au nord de Paris, nous avons renoué avec la tradition de la couleur. En effet, il existe une longue tradition de mise en couleur des ouvrages d'art. Des franchissements majeurs et de plus petits ouvrages sont peints dans des

couleurs qui contrastent avec leur environnement. On pense évidemment au viaduc de Garabit, au Golden Gate à San Francisco ou aux passerelles des jardins traditionnels japonais.

Pour la passerelle de la darse du Millénaire, nous avons opté pour un rouge intense. Cette teinte renvoie évidemment au passé industriel du site, aux entrepôts de brique et à l'évocation qu'en font les constructions contemporaines en bord de darse. La couleur de la passerelle contribue à donner un caractère spécifique à ce nouveau morceau de ville, entre Paris et la petite couronne.

Pour la passerelle du marché à Maisons-Laffitte, l'approche était différente : l'ouvrage constitue un des rares franchissements du faisceau ferroviaire qui traverse la ville de part en part. Nous avons travaillé la bonne intégration de l'ouvrage en agrandissant visuellement et fonctionnellement la place du marché à laquelle il est connecté, et en proposant un aménagement urbain unitaire.

6- La passerelle du marché à Maisons-Laffitte.

7- La future Maison de la Tunisie dans la Cité Universitaire de Paris.

8- L'architecture en zone urbaine du viaduc de la Ligne 18.

9- Le viaduc de la Ligne 18 du Grand Paris Express dans une section « à la campagne ».

Cette approche a permis de décongestionner la place pour faciliter l'entrée dans la halle de marché existante tout en mettant en valeur un franchissement contemporain dans une ville à l'architecture plutôt traditionnelle.

La passerelle est intégralement métallique. Elle se compose de deux escaliers et d'une travée principale qui créent un parcours fluide et élégant. Les escaliers et le tablier sont réalisés sous la forme de caissons lisses en forme de U, appuyés sur des poteaux tubulaires.

Le tracé en plan de l'ouvrage est en forme de « Z », les ascenseurs étant conçus comme des contrepoints de la composition. Ce sont des objets prismatiques en verre teinté sombre qui contrastent avec les caissons peints en blanc. Le choix d'ascenseurs et d'escaliers résulte du fait que l'espace disponible ne permettait pas la mise en place de rampes d'accès PMR.

La nouvelle passerelle franchit un espace ferroviaire qui se caractérise par une nuée de caténaires et de portiques d'aspect industriel. Par ses formes douces et contemporaines, l'ouvrage contraste avec son environnement. Il est ainsi perçu comme attractif par les habitants.

L'une des difficultés d'une telle réalisation concerne sa mise en place qui doit être réalisée de nuit, à une date déterminée très longtemps à l'avance, pendant une interruption du trafic ferroviaire.

Parmi les projets que vous avez en cours dans le cadre du Grand Paris Express, quels sont ceux dont la réalisation est déjà programmée ou engagée ?

L'agence est très impliquée dans la réalisation du Grand Paris Express

© MICHEL DENANCÉ

6



© EXPLORATIONS ARCHITECTURE

7





8

pour lequel nous concevons les gares de Val-de-Fontenay et Nogent-Le Perreux sur la Ligne 15 Est ; celle du Mesnil-Amelot sur la Ligne 17 au nord de Roissy, ainsi que le viaduc de 14 km de la Ligne 18 entre l'aéroport d'Orly et Versailles-Chantiers.

Ce viaduc traversera d'est en ouest le plateau de Saclay. Nous en assurons la maîtrise d'œuvre architecturale en collaboration avec Artelia et Ingerop au niveau de l'ingénierie. Ce viaduc constituera la partie visible la plus importante du projet Grand Paris Express. Il inclura trois gares aériennes qui desserviront

les nouveaux quartiers du plateau de Saclay. Il est assez rare en Europe, et a fortiori en France, de réaliser des lignes aériennes d'une telle ampleur. Le projet développe une très grande exigence architecturale d'autant qu'il sera construit dans une zone agricole et forestière extrêmement sensible en ce qui concerne la protection environnementale.

Nous avons proposé des solutions rarement mises en œuvre en ce qui concerne la disposition des voies, l'intégration des systèmes et l'évacuation des voyageurs en partie centrale,

ce afin d'en diminuer l'impact visuel. L'ouvrage aura une hauteur d'une dizaine de mètres afin de s'inscrire élégamment sur les horizons agricoles du plateau, un lieu historiquement lié au Château de Versailles. Des aménagements paysagers sont prévus sous le viaduc en fonction des séquences qui sont soit très urbanisées soit complètement dans la campagne.

Il s'agit d'un ouvrage en voussoirs préfabriqués - de l'ordre de 5000 - qui seront mis en place à l'aide de plusieurs poutres de lancement. Ce sera un chantier très spectaculaire.

Avez-vous également des réalisations en cours avec la SNCF ?

Nous avons gagné le concours de la gare de Nanterre La Folie, sur le prolongement à l'ouest de la Ligne E du RER à laquelle sont associés trois ponts routes - Césaire, Arago et Hébert - qui nous ont également été confiés.

L'ensemble devant permettre à la ville de Nanterre de créer une nouvelle urbanité derrière la Grande Arche⁽²⁾. Cette gare aérienne sera interconnectée avec celle de la Ligne 15 Ouest du Grand Paris Express. ▶

9



Elle est implantée sur un faisceau ferroviaire aujourd'hui partiellement désaffecté et symbolise la première étape de la profonde mutation de ce quartier. Avec ce projet, nous avons porté une attention et un soin particuliers à l'intégration architecturale, paysagère et environnementale de la gare et des ouvrages d'art au sein d'un quartier recomposé et plus accessible. L'arrivée d'Éole constitue une occasion unique pour désenclaver ce site, aujourd'hui très marqué par la présence du plateau ferroviaire. Parallèlement aux travaux d'Éole, l'Epadesa aura en charge l'aménagement des Groues, futur 11^e quartier de Nanterre de rayonnement métropolitain et dont la programmation contribuera à l'attractivité du quartier d'affaires de La Défense.

D'ici à 2025, ce sont potentiellement plus de 500 000 m² de logements - avec près de 2 500 logements au sein du secteur de la gare, d'activités tertiaires, de commerces, de services et d'équipements qui seront livrés.

Parmi les réalisations récentes de l'agence à l'international ?

Nous faisons partie de l'équipe à laquelle a été confiée en conception-réalisation le pont à haubans sur la rivière Wear à Sunderland, en Angleterre. Ce pont réalisé par les entreprises belge Victor Buyck pour la partie métallique et irlandaise Farrans pour le génie civil comporte un mât d'une centaine de mètres de haut. Fabriqué d'un seul tenant en Belgique, il a été acheminé par barge sur la Mer du Nord et mis en place par rotation sur le site. Nous avons particulièrement soigné l'architecture du mât, sa géométrie, ses détails d'ancrage des haubans et sa mise en lumière.



10

© EXPLORATIONS ARCHITECTURE

Cette démarche de conception-réalisation, que nous rencontrons de plus en plus souvent, nous convient bien. Elle présente l'avantage d'associer dès le départ du projet la conception architecturale, les enjeux techniques et bien évidemment les questions économiques.

Quelques exemples dans le domaine du bâtiment ?

Nous avons remporté le projet de reconstruction de l'ambassade de France à Port-au-Prince en Haïti, qui constitue une opération de référence pour le Ministère des Affaires Étrangères, car réalisée dans le contexte d'un pays historiquement lié à la France. En effet, ce bâtiment sera la seule représentation diplomatique encore

10- Le mât haubané de 100 m de haut du pont sur la Wear.

11- La gare de Nanterre-la-Folie du prolongement de la ligne E du RER vers l'ouest.

12- Les trois ponts-routes à proximité de la gare de Nanterre-la-Folie du RER E.

13- Les bureaux parisiens de l'agence Explorations Architecture.

14- Le projet « Les Quais en Seine » dans le port du Havre.

installée dans le centre historique de la capitale haïtienne. Jusqu'au tremblement de terre du 12 janvier 2010, elle y occupait une grande bâtisse bourgeoise du début du XX^e siècle, la « Maison Laroche ». Ce bâtiment a été fortement endommagé par le séisme et a dû être rasé.

Il a été choisi en 2011 de reconstruire l'ambassade de France sur son emplacement historique du Champ-de-Mars. C'était une décision forte et symbolique.

Un nouveau bâtiment est donc en cours de construction sur lequel les normes anticycloniques et antisismiques les plus contraignantes ont évidemment été appliquées. L'idée était que l'État français réalise un bâtiment emblématique en termes de sécurité aussi bien que de réflexion environnementale sur le confort des usagers.

Un tel chantier pose de nombreux problèmes tant en ce qui concerne les compétences locales que l'approvisionnement en matériaux, qui sont importés en quasi-totalité.

Le bâtiment que nous avons conçu propose une architecture bioclimatique, adaptée au climat tropical avec de grands toits débordants, la possibilité d'une ventilation naturelle traversante, une gestion affinée de la lumière pour atténuer la très forte luminosité naturelle au niveau des postes de travail. À ceci s'ajoute un aménagement paysager soigné qui se veut une évocation des écosystèmes locaux.

Plus près de nous, nous avons gagné le projet « Les Quais en Seine » au cœur du port du Havre dans le cadre du concours « Réinventer la Seine ». La Ville du Havre a lancé depuis une quinzaine d'années un projet de reconquête de la partie du port la plus proche du centre-ville. L'opération

© EXPLORATIONS ARCHITECTURE

11



20

TRAVAUX N° 940 MARS 2018

© EXPLORATIONS ARCHITECTURE

12



« Les Quais en Seine » s'insère dans cette dynamique urbaine.

Le site est situé au bout de la presqu'île Frissard, à proximité immédiate des bassins Vauban, Vatine et de l'Eure, au contact de plusieurs établissements d'enseignement supérieur du campus du centre-ville en devenir.

Il s'agit d'un îlot mixte comprenant une résidence hôtelière de 120 chambres, une résidence étudiante de 85 chambres, un immeuble d'habitation de 45 logements qui fera office de « signal » architectural. Le projet comporte également une ferme aquaponique qui offrira des fruits, des légumes ainsi qu'un élevage de poissons.

Il est un autre projet de bâtiment, parisien celui-là, qui suscite beaucoup d'intérêt tant en raison de sa destination que de son implantation : c'est celui de la Maison de la Tunisie.

La Maison de la Tunisie au cœur de la Cité Internationale Universitaire, dans le 14^e arrondissement de Paris, est destinée à doubler le bâtiment existant construit il y a plus de 60 ans.

Côté architectural, ce bâtiment R+8 de 200 logements, d'une superficie de 5100 m² s'inscrit donc naturellement dans la tradition des maisons de la Cité en développant une architecture évocatrice du pays hôte.

Plutôt que de renvoyer à un style architectural ou une époque spécifique, le projet constitue une évocation abstraite de la culture tunisienne à travers une façade écran conçue en collaboration avec l'artiste Shoof.

Cette "façade double peau en aluminium" évoquera tout autant la calligraphie arabo-musulmane que la tradition du moucharabieh dans l'architecture tunisienne. D'un point de vue fonction-

© MICHEL DENANCÉ



EXPLORATIONS ARCHITECTURE EN BREF

Benoît Le Thierry d'Ennequin et Yves Pagès sont diplômés de l'École d'Architecture de Paris - La Défense (2000).

Leur intérêt pour les structures et la manière dont l'architecture doit révéler la matière les conduit d'emblée à développer une écriture à la fois sobre et expressive.

Après quelques brèves années passées dans plusieurs agences d'architecture pour apprendre le métier, ils décident rapidement de s'associer et créent en 2002 Explorations Architecture après avoir remporté la même année le prix « Nouveaux albums des Jeunes Architectes » décerné par le Ministère de la Culture et de la Communication. Cette récompense faisait d'ailleurs suite à l'obtention de l'Équerre verte décernée en 2000 par l'Agence Régionale de l'Environnement et des Nouvelles Énergies.

L'obtention du prix « Nouveaux Albums » leur permet d'entrer en contact avec des maîtres d'ouvrage publics et d'avoir accès à leurs premiers concours.

Chemin faisant, Explorations Architecture se développe en France et à l'étranger dans des domaines aussi variés que le design, le logement, le tertiaire, les bâtiments publics, les projets de transport, les structures complexes ou les ouvrages d'art, un sujet qui leur tient tout particulièrement à cœur. L'agence travaille désormais à part égale entre le public et le privé. Elle est habituée à tous les types de marché : conception classique, conception-réalisation, partenariat, mécénat etc.

L'agence emploie actuellement une trentaine de collaborateurs. Elle dispose également d'antennes à Nantes et Bordeaux afin de suivre au plus près les projets du Grand Ouest.

nel, la façade protégera efficacement les résidents contre l'ensoleillement et donnera une véritable intimité à tous les espaces, y compris la nuit le long du périphérique.

L'architecture du pavillon incarne la Tunisie du 21^e siècle, un pays jeune, dynamique et ouvert - à la jonction entre l'Europe, la Méditerranée et le cœur de l'Afrique.

Le projet, qui sera livré en 2019, est réalisé dans le cadre de l'extension du campus universitaire du boulevard Jourdan qui prévoit la création de 1 800 nouveaux logements.

Pour conclure, quelles sont les idées fortes sur lesquelles votre agence fonde sa pratique ?

Nous recherchons un équilibre entre les échelles, du grand paysage au détails d'exécution, avec la volonté d'intégrer le matériel et l'immatériel, le structurel et la lumière, l'enveloppe et l'usage. Pour tous les projets, nous faisons en sorte de réduire les complexités techniques et normatives au point de les faire disparaître.

Quelles que soient la nature et la destination d'une réalisation, notre objectif est de trouver des formes parlantes et contenues qui expriment la justesse et la simplicité. □

1- Le projet est un double bow string conçu par l'équipe Explorations Architecture, Flint & Neill Limited, AIA Ingénierie et les Éclairagistes Associés. La construction a été réalisée par GTM TP Lyon en groupement avec Tournaud, Citeos Lyon et Cordioli.

2- Le projet de la gare de Nanterre La Folie d'Éole est confié au groupement Arcadis (mandataire), KCAP, Explorations Architecture, d'Ici Là Paysagistes, Franck Boutté Consultants, Mazet & Associés. Le groupement a été désigné par SNCF Réseau, maître d'ouvrage du projet de prolongement du RER E - Éole - vers l'Ouest, en lien avec l'Epadesa, le Conseil Général des Hauts-de-Seine, la DRIEA et la ville de Nanterre.

© EXPLORATIONS ARCHITECTURE

14





© LATITUDE DRONE

LATITUDE DRONE

L'AIR ET L'EAU

POUR ESPACE D'INSPECTION ET DE MODÉLISATION 3D

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

SI LES DRONES SONT DÉSORMAIS UTILISÉS POUR LES REPORTAGES TOURISTIQUES OU SPORTIFS À LA TÉLÉVISION, LES MANIFESTATIONS OFFICIELLES, FESTIVES OU COMMÉMORATIVES, VOIRE POUR IMMORTALISER LES ÉVÉNEMENTS MARQUANTS DU QUOTIDIEN DANS LE CERCLE FAMILIAL, LEUR TECHNOLOGIE - C'EST CE QUI NOUS INTÉRESSE ICI - PRÉSENTE DES ATOUTS MAJEURS DANS LE DOMAINE DE LA GÉOTECHNIQUE ET DONC DES TRAVAUX PUBLICS ET DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, PAR SA GRANDE POLYVALENCE ET LA QUALITÉ DES DONNÉES QU'ELLE PRODUIT.

Tel est le constat d'Arnaud Stephan, fondateur en 2015 de Latitude Drone, une jeune entreprise basée à Annecy. Cet ingénieur géotechnicien disposant d'une expérience de plus de 15 ans dans les Travaux Publics a su convaincre ses premiers clients que l'utilisation de cet aéronef télépiloté propose des prestations et donne des résultats impossibles à

obtenir avec des moyens traditionnels. Si ses premiers interlocuteurs le connaissaient et l'appréciaient comme géotechnicien, il lui a fallu également les convaincre de ses compétences dans une autre fonction : celle de l'acquisition de données par drone. « Au départ, indique Arnaud Stephan, je me suis concentré sur le drone dans la modélisation 3D puisque c'est un

1- Mise à l'eau du bateau drone par Arnaud Stephan et Olivier Dufayt.

outil qui permet de faire principalement ce type d'activité ainsi que dans l'inspection technique, un domaine dont je pense qu'il n'est pas encore développé autant qu'il pourrait l'être. De plus, depuis juin 2017, j'ai développé avec un partenaire un "bateau drone" pour réaliser de l'acquisition bathymétrique. Cela répondait à la demande de certains clients désireux

de disposer de relevés sous l'eau notamment à proximité de berges ». En effet, cet appareil permet de réaliser l'acquisition mixte - terrestre et aquatique - et de fusionner les données 3D pour disposer d'un modèle unique s'étendant de la berge jusqu'à quelques mètres de profondeur, le bateau drone pouvant par ailleurs intervenir jusqu'à une centaine de mètres de profondeur.

De telles mesures se font actuellement à l'aide d'un bateau traditionnel, ce qui nécessite deux personnes à bord, un ordinateur et son équipement de mesure. Avec son bateau drone, Latitude Drone entend changer, sinon révolutionner, la méthode d'acquisition de données. Le premier objectif est de pouvoir engager les mesures bathymétriques dans des zones de très faible profondeur, auxquelles un bateau ne peut accéder, ou dans des zones encombrées à l'intérieur desquelles les manœuvres d'un bateau traditionnel sont difficiles. Le deuxième objectif est de diminuer le coût global des opérations en ne faisant appel qu'à un opérateur unique au lieu de

2- Arnaud Stephan, directeur de Latitude Drone.

3- Modélisation d'un glissement de terrain.

4- Arnaud Stephan aux commandes d'un quadricoptère en inspection d'éboulement de falaise.



2

LATITUDE DRONE ET ARNAUD STEPHAN : PARCOURS

Arnaud Stephan est titulaire d'un DESS de géologie-géotechnique, ingénierie géotechnique et géo-environnementale de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI).

Après cette formation universitaire mixte de géologue-géotechnicien suivie entre 1995 et 2000, il passe deux années (2000-2002) dans le bureau d'études géotechniques haut-savoyard Geos Ingénieurs Conseils, racheté depuis par Ingerop, avant d'intégrer en 2002 l'agence lyonnaise de EEG-Simecsol, devenue Arcadis, au sein duquel il assure, de 2002 à 2015, la fonction de responsable du suivi de chantier sur des opérations à plusieurs millions d'euros, pilotage, planning, réceptions de travaux.

L'envie d'entreprendre le motive très rapidement et il propose d'ailleurs à Yann Leblais, alors président de la structure France de EEG-Simecsol, de créer une entité dans les deux Savoie. Ceci lui permet de développer la géotechnique dans le domaine de la montagne, avec une entité basée d'abord à Chambéry puis transférée à Annecy. Cette petite structure devient rapidement le point d'appui d'Arcadis pour les chantiers locaux.

Après quinze années d'ingénierie géotechnique et de maîtrise d'œuvre dans des projets d'infrastructures urbaines au sein d'Arcadis, Arnaud Stephan donne corps à son projet d'entreprise et crée en février 2015 Latitude Drone en partant du constat que les drones professionnels, qui commençaient à arriver sur le marché, possédaient un réel intérêt dans les métiers de l'aménagement du territoire et des Travaux Publics.

Latitude Drone était née, basée à Annecy, en Haute Savoie. Son champ d'intervention s'étend à l'ensemble de l'hexagone.

deux, avec une mise à l'eau nettement plus facile à partir de n'importe quel type de berge. Cela répond également à une problématique de sécurité, par exemple dans le cas d'eaux chargées ou polluées avec des émanations de gaz ou de produits toxiques.

À cet effet, Latitude Drone a créé à l'été 2017 la marque "Bathymétrie Drone" co-développée avec IxAlp Drone, également basée en Haute-Savoie, dirigée par Olivier Dufayt qui a associé ses compétences dans le domaine de la l'environnement à celle d'Arnaud Stephan.

Toutefois, l'essentiel de l'activité de l'entreprise demeure orienté vers les drones volants, sa vocation première. Elle dispose ainsi d'un parc de quadricoptères, à quatre moteurs, d'hexaoptères, à six moteurs, d'une aile volante et du bateau drone.

« *Le choix du nombre de moteurs dépend essentiellement de la charge utile requise*, précise Arnaud Stephan, *le drone en tant que tel n'étant qu'un vecteur, un porteur sous lequel on peut installer plusieurs types d'appareils* ». Dans l'immédiat, Latitude Drone utilise des caméras en spectre visible réalisant de la photographie numérique classique ou de la vidéo. L'entreprise travaille à l'intégration d'une caméra spécifique pour l'inspection avec un zoom très puissant - 30 fois - et un niveau de stabilisation élevé, pour inspecter des structures, même éloignées, en toute sécurité.

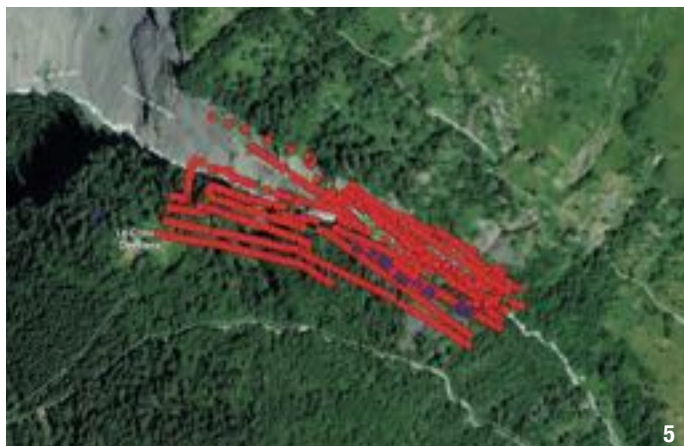
Le matériel embarqué est en mesure de répondre à l'ensemble des besoins : caméra 360°, caméra thermique, capteur GOPRO 4, projections laser sur ouvrages pour recalage géométrique, GPS RTK, caméras à spectre visible. ▷



3



4



Les drones exploités permettent de couvrir un vaste éventail de sujets :

- Caractérisation des volumétries dans les projets de terrassement ;
- Modélisation des masses rocheuses instables et des fractures associées ;
- Suivi de terrains et masses rocheuses instables ;
- Inspections d'ouvrages ;
- Modèle 3D texturé.

L'entreprise ne s'interdit pas non plus, bien qu'elle ne le fasse pas encore régulièrement, d'aborder le domaine du drone équipé de caméras infrarouge ou à spectres spécifiques pour l'inspection de panneaux solaires, de l'étanchéité de châteaux d'eau, d'exploitations agricoles pour en déduire l'activité foliaire des plantes ou pour larguer des larves antiparasites (trichogrammes)...

INSPECTER ET MODÉLISER PAR PHOTOGRAMMÉTRIE

Inspection et modélisation 3D constituent l'activité principale de l'entreprise. La modélisation 3D permet de réaliser sur de grandes surfaces des acquisitions avec des rendements très nettement supérieurs à ceux d'un géomètre "à pied" sur le terrain. Ces acquisitions

se font à grande densité, avec énormément de points à partir desquels l'information doit être qualifiée a posteriori, c'est-à-dire avec une méthodologie différente de celle des géomètres, notamment en densité : là où un géomètre placera un point par 10 m², un drone peut en placer entre 10 et 100 par m². Il y a des sujets pour lesquels le travail du géomètre demeure rentable et nécessaire, il y en a d'autres sur lesquels le recours au drone devient pertinent. « Un exemple concret est donné par le relevé de stocks sur des carrières, précise Arnaud Stephan. La méthode "d'avant le drone" était d'envoyer un géomètre sur les tas pour en déterminer le contour et la hauteur. Avec le drone, la caméra passe au-dessus des tas qu'elle photographie en deux dimensions et la troisième dimension est ensuite reconstituée à partir de la méthode photogrammétrique⁽¹⁾. Cette méthode assez ancienne - elle date du début des années 50 - suscite actuellement un regain d'intérêt à la suite de l'arrivée du drone ».

« C'est ainsi que des spécialistes de la photogrammétrie ont développé de nouveaux logiciels professionnels pour répondre à ce besoin, en particulier un

5- Positions des photos prises dans la gorge du glacier du Miage.

6- Modélisation 3D de la gorge inaccessible du glacier du Miage.

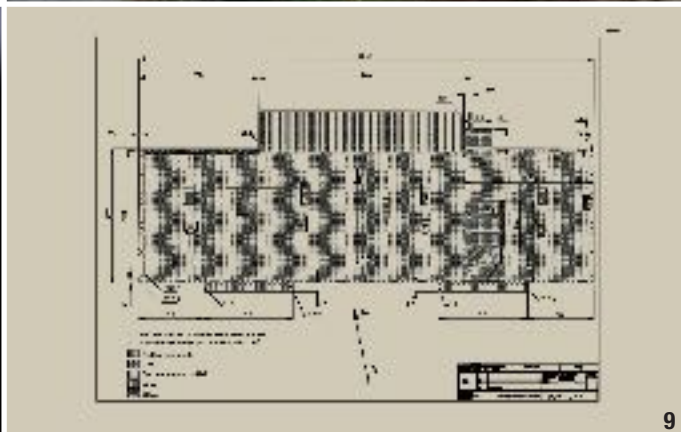
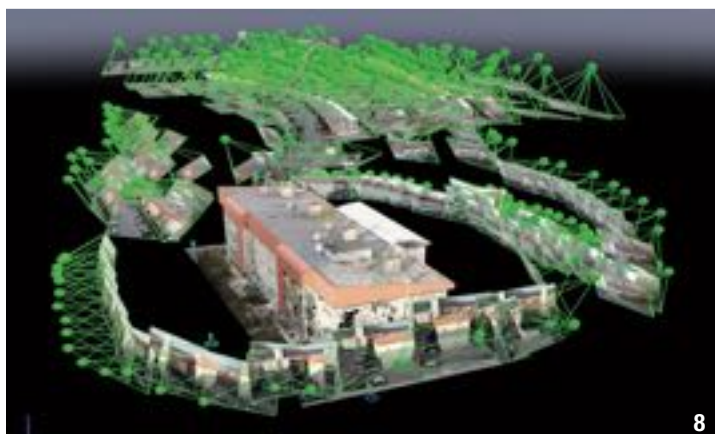
7- Orthophotographie de la toiture d'un bâtiment à Grenoble.

8- Logiciel de reconstruction de la modélisation des photos d'un bâtiment.

9- Plan coté de la toiture d'un bâtiment obtenu à partir des photos 2D réalisées par drone.

leader sur le marché, le Laboratoire des Systèmes Intelligents (LIS) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, dès 2001, que nous utilisons sous licence ».

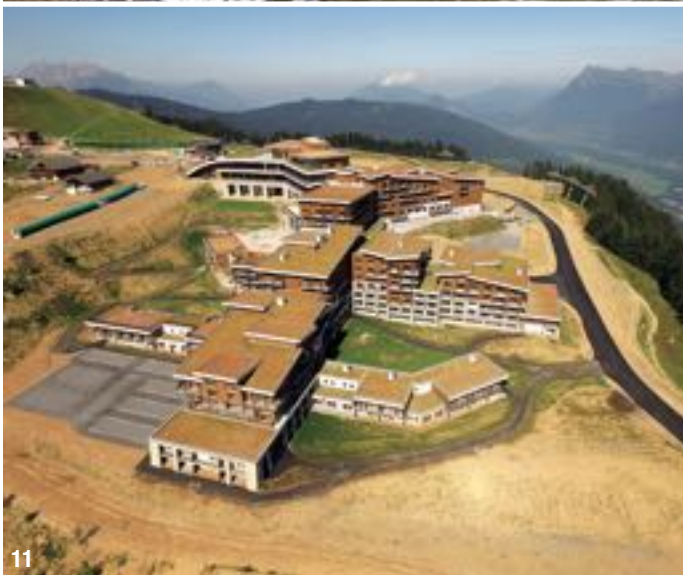
L'EPFL a conçu et distribue le logiciel Pix4D qui offre une solution complète de cartographie et de modélisation pour convertir des centaines d'images en mosaïques 2D géoréférencées et en modèles 3D. L'algorithme développé par Pix4D permet en effet d'assembler ces images et d'obtenir en quelques minutes un plan 3D extrêmement précis du terrain ou de l'ouvrage observé. Un autre domaine encore méconnu est l'utilisation du drone au service de la sécurité civile. Latitude Drone a été contactée à ce sujet par le SDIS 74 (Service Départemental d'Incendie





© LATITUDE DRONE

10



© LATITUDE DRONE

11

10 & 11- Suivi du chantier du club Med de Samoëns du début des terrassements jusqu'à l'achèvement des travaux.

12- Image réalisée par drone des roselières du lac du Bourget.

13- Passage d'un drone sur un foyer d'incendie pour le Service Départemental d'Incendie et de Secours de Haute-Savoie.

et de Secours de Haute-Savoie), qui recherchait des partenaires utilisateurs de drones pour apporter cette technologie dans les opérations de secours : faire passer un drone sur un foyer d'incendie pour détecter les températures, rechercher des victimes tombées dans des gorges inaccessibles...

« Elle a été la seule retenue, précise Arnaud Stephan, avec l'Alp Drone, en l'occurrence notre partenaire co-fondateur du bateau drone, pour poursuivre cette expérimentation réalisée à titre bénévole ».

Il s'agit là de sujets annexes aux Travaux Publics mais qui font partie de l'univers très varié des utilisations du drone : sites de stockages de résidus industriels, d'ordures ménagères, projets routiers et ferroviaires, carrières de roche massive ou alluvionnaire, sites miniers, ouvrages d'art...



© LATITUDE DRONE

12



13

INSPECTION DE FALAISES INSTABLES

Dans le domaine de la géotechnique proprement dite, l'entreprise intervient dans le cadre de glissements de terrain. En effet, la méthodologie du drone fournit une telle densité de mesures qu'elle permet de passer plusieurs fois sur un même sujet et de quantifier avec une extrême précision son évolution dans le temps en faisant du comparatif de modèle à modèle en mettant en évidence, dans le détail, les déplacements successifs des strates de terrain dans le site considéré, tout particulièrement dans les zones dangereuses difficilement accessibles aux géomètres.

Sur les problématiques de désagrégation et d'effondrement de falaises, le passage d'un drone fournit au bureau d'études chargé de la stabilisation éventuelle une vue complète et très détaillée de la zone concernée, ce qui leur permet de préparer les interventions avec des équipes sur cordes. ▷

Les images étant fournies en trois dimensions, il est possible d'établir une classification de fractures intéressante pour les géologues.

Quelques exemples d'intervention montrent la diversité des domaines dans lesquels le drone peut rendre de précieux services.

LES ROSELIÈRES DU LAC DU BOURGET

Latitude Drone est intervenue récemment sur le lac de la vallée de l'Arve, près de Thyez, qui venait d'être vidé de son contenu préalablement à un curage général.

Le géomètre mandaté par l'entreprise avait mis en évidence la difficulté de se rendre physiquement sur les lieux en raison de l'instabilité et de l'épaisseur de la vase concernée. Le survol de drone avant les travaux a permis de modéliser l'état du lac et des boues. À l'issue du curage, un second survol permettra de faire l'état final après les travaux et d'évaluer à 0,5% près les volumes excavés.

Courant l'été 2017, l'entreprise a réalisé la cartographie des 260 hectares de roselières du lac du Bourget. En effet, leur superficie a tendance à diminuer année après année en raison de la trop grande régularité de niveau du lac, régulé notamment par le Rhône et plusieurs petits barrages.

Le syndicat chargé de la gestion du lac a décidé de réaliser une baisse exceptionnelle de 70 cm du niveau par rapport à la cote standard afin de contraindre les racines des roseaux à chercher l'eau plus loin ce qui pourrait contribuer à leur redonner de la vigueur. Dans une première phase, un drone a réalisé l'acquisition de l'ensemble des surfaces de roselières avant la baisse du niveau de l'eau. Dans quelques mois, un nouveau survol permettra de mesurer la variation éventuelle de l'étendue des surfaces à l'issue de cette phase d'expérimentation.

GESTION DE CARRIÈRES DE GRANULATS

Les interventions en carrière ont déjà été évoquées précédemment en ce qui concerne l'évaluation des stocks. Elles peuvent fournir des informations supplémentaires relatives à la gestion d'une installation.

Les survols de drone facilitent l'exigence contractuelle qu'ont les carriers de faire état fin juin et fin décembre de chaque année des relevés de stock. Leur mise en œuvre permet également de réaliser un relevé précis et complet



© LATITUDE DRONE

LE BATEAU DRONE DE BATHYMÉTRIE DRONE

Quelques informations complémentaires permettent de préciser la simplicité d'utilisation et l'intérêt du bateau drone conçu par Latitude Drone et Ixalp Drone.

Une fois sorti de la voiture, il faut moins de 5 minutes pour la mise à l'eau du système. Grâce à l'interface de pilotage depuis la berge, l'opérateur programme le trajet autonome du bateau et se concentre sur ses mesures.

Le bateau est équipé d'un système de positionnement centimétrique ainsi que d'un échosondeur double-fréquence de qualité scientifique capable de différencier les vases des fonds durs.

Les opérations sont gérées par un seul opérateur. Le bateau a été développé à partir d'outils "open source" pour aboutir à un projet économique et évolutif dans le temps.

Le système est conçu pour se déplacer là où les moyens traditionnels de bathymétrie ne vont pas : zones de très faible profondeur, bassins de lagunages, ports encombrés...

Il est équipé d'un sondeur bi-fréquence pour l'étude de la sédimentation : haute fréquence 200 khz et basse fréquence 33 khz.

Deux résultats de profondeurs sont ainsi obtenus : le sommet des sédiments et le sommet de la couche inférieure plus compacte.

en trois dimensions de l'état d'une carrière.

« C'est ce qu'a réalisé dernièrement Latitude Drone, précise Arnaud Stephan, sur la carrière de calcaire de Saint-Jeoire, en Haute-Savoie : front de taille, pistes d'accès, installations de concassage/criblage, stocks par granulométrie... »

DES ÉCRANS ACOUSTIQUES AUTOROUTIERS

Sur l'autoroute A7, au sud de Lyon, Latitude Drone est intervenue à la demande du concessionnaire pour effectuer un relevé des écrans acoustiques récemment installés sur une longueur totale de 7 km, de part et d'autre de l'autoroute, à hauteur de Valence. La demande concernait un relevé de la tête des écrans pour vérifier qu'ils répondaient bien aux critères initiaux de réduction du bruit.

14- Mesures de bathymétrie à l'aide du "bateau drone".

« Pourquoi le drone ? interroge Arnaud Stephan. Il s'agissait d'intervenir durant la première semaine des vacances de juillet, période très critique pour le concessionnaire qui excluait notamment la mise en place d'un balisage pour effectuer ce type de relevés. La solution par drone n'apportait aucune contrainte au gestionnaire de l'autoroute, les drones ayant évolué de part et d'autre des voies à la distance réglementaire de 30 m minimum, ce qui a permis de fournir au client la modélisation de la tête de l'écran en trois dimensions, avec une précision inférieure à

5 cm ; modélisation qu'il a pu injecter dans ses logiciels d'analyse afin de réaliser les simulations acoustiques ».

UNE GORGE INACCESSIBLE

La faculté du drone de s'insérer dans des zones inaccessibles est illustrée par une intervention de Latitude Drone dans le massif du Mont Blanc.

Au pied de ce massif se situe le glacier du Miage, parcouru par un torrent qui traverse une gorge très étroite dont l'accès est impossible même à pied. Le bureau d'études ayant consulté l'entreprise avait pour projet de remplacer une conduite d'eau forcée passant dans cette gorge et avait besoin d'une implantation en 3D pour caler la position et le dessin de la nouvelle conduite. À l'aide d'un drone, l'ensemble du secteur concerné de la gorge a été modélisé par photogrammétrie ce qui a permis au bureau d'études de réaliser un dessin extrêmement précis du projet à réaliser.

LE DOMAINE DU BÂTIMENT

À Grenoble, un bailleur social avait besoin de disposer de plans cotés de toitures en fibro-ciment de certains des immeubles de son parc immobilier en vue d'un désamiantage. Ces toitures sont inaccessibles sauf à l'aide d'une nacelle. Elles ne sont sécurisées par aucun dispositif de retenue.

Pour réaliser l'opération, Latitude Drone a fait passer un drone sur lesdites toitures afin d'en établir des plans et a pu ainsi fournir au client des plans entièrement cotés comportant l'ensemble des informations souhaitées.

Ces plans sont obtenus par assemblage de l'ensemble des photos 2D prises par le drone pour en réaliser une modélisation 3D permettant de construire une photo orthorectifiée à l'aide d'un logiciel spécifique.

Toujours dans le domaine de la construction, l'entreprise a également été retenue pour assurer la surveillance régulière par drone de l'avancement de l'intégralité du chantier du nouveau Club Med de Samoëns à 1 600 m d'altitude sur le plateau des Saix. Il s'agit du village à quatre tridents "Grand Massif Samoëns Morillon", un resort haut de gamme de 420 chambres à 1h15 de l'aéroport international de Genève.

L'opération s'est étendue sur deux ans et permet au maître d'ouvrage de disposer d'une information intégrale sur cette opération immobilière, de la phase de fondations et de terrassements jusqu'aux dernières interventions

15



16

© MARC MONTAGNON



17

© LATITUDE DRONE

15- Drone quadricoptère en vol.

16- L'un des quadricoptères de Latitude Drone.

17- L'une des ailes volantes de l'entreprise.

au niveau du second œuvre. Le Club Med de Samoëns a ouvert ses portes le 17 décembre 2017.

LES VALEURS DE L'INNOVATION

La diversité des opérations réalisées par Latitude Drone depuis sa création tout récente témoigne de ses objectifs : fournir des prestations par drone à destination des acteurs de l'aménagement du territoire en proposant quotidiennement des prestations innovantes et économiques permettant de répondre aux besoins les plus inattendus et les plus spécifiques.

L'entreprise est habilitée par la DGAC² à exercer ses activités pour les scénarios

LES MOYENS TECHNIQUES VOLANTS

Latitude Drone exploite cinq aéronefs télépilotés dont certains ont été fournis par la société Escadrone en Isère. La fiabilité des machines et le service après-vente fourni ont été des critères prépondérants dans le choix de ce prestataire.

LD-Light : aéronef de moins de 2 kg pouvant évoluer dans les scénarios S1, S2 et S3. Il est équipé d'une nacelle stabilisée 3 axes et d'une caméra GOPRO 4 permettant de filmer en technologie 4K. Il offre une durée de vol de l'ordre de 15 minutes par batterie.

LD-Pro (2 unités) : aéronef de moins de 4 kg pouvant évoluer dans les scénarios S1, S2 et S3. Il est équipé d'une nacelle stabilisée 2 axes dédiée aux prestations techniques et pouvant accueillir un grand nombre de capteurs. Il embarque par défaut un appareil photo de 24 MPix qui peut facilement être remplacé par une caméra thermique ou multi-spectrale. Sa voilure tournante, plus importante que celle du LD-Light, lui permet d'évoluer dans des conditions de vent plus délicates. L'autonomie du LD-Pro peut atteindre 45 minutes suivant la charge emportée. Les durées totales de vol sont multipliées par l'emploi de plusieurs batteries.

LD-Show : aéronef de moins de 2 kg emportant une nacelle 3 axes et qui filme en 4K. C'est le drone de référence pour les productions vidéo. Il dispose de 20 minutes d'autonomie.

LD-Tech : aéronef de moins de 2 kg emportant une nacelle 3 axes et qui filme en 4K. Doté de capteurs d'évitement d'obstacles et d'un tout nouveau capteur photo de 20 Mpix, c'est la machine de prédilection pour les inspections rapprochées. Il offre une autonomie de 25 à 30 minutes.

rios de vol S1, S2 et S3, conformément à l'arrêté du 17 décembre 2015.

Ses aéronefs sont également homologués par la DGAC.

Par ailleurs, elle s'est entourée de partenaires dans l'acquisition laser lidar et dans le développement de ses drones afin de proposer des solutions tout en un.

Faire voler un aéronef télépiloté demande des connaissances spécifiques en aéronautique (zones réglementées, météorologie, sécurité).

Ses connaissances s'ajoutent à l'expérience de 15 ans d'Arnaud Stephan dans les Travaux Publics. □

1- La **photogrammétrie** est une technique qui consiste à effectuer des mesures dans une scène, en utilisant la parallaxe obtenue entre des images acquises selon des points de vue différents. Recopiant la vision stéréoscopique humaine, elle a longtemps exploité celle-ci pour reconstituer le relief de la scène à partir de cette différence de points de vue. Elle exploite de plus en plus les calculs de corrélation entre des images désormais numériques. Cette technique repose entièrement sur une modélisation rigoureuse de la géométrie des images et de leur acquisition afin de reconstituer une copie 3D exacte de la réalité.

2- **DGAC** : Direction Générale de l'Aviation Civile.



VIADUC DE FRANCHISSEMENT DU GIFFRE À MARIGNIER (74)

AUTEURS : BERTRAND LOUPPE, RESPONSABLE D'ÉQUIPE, ARCADIS - GUILLAUME FERNANDEZ, INGÉNIEUR, ARCADIS - JÉRÉMY CATTET, INGÉNIEUR-CHEF DE PROJET, ARCADIS - NICOLAS FAURE-VINCENT, CONDUCTEUR DE TRAVAUX, DEMATHIEU BARD

CE VIADUC DE 300 m DE LONG QUI S'IMPLANTE DANS UN SITE NATUREL EST UN ÉLÉMENT REMARQUABLE DU PROJET DE CONTOURNEMENT DE MARIGNIER-THYEZ. SI LE TABLIER EN CAISSON MIXTE EST D'UNE CONCEPTION RELATIVEMENT CLASSIQUE, C'EST LA PARTIE NON VISIBLE DE L'OUVRAGE QUI CONSTITUE UN DÉFI TECHNIQUE. LES CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES MÉDIOCRES DES TERRAINS ET LA PRISE EN COMPTE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION DES SOLS SOUS SÉISME ONT CONDUIT À CONCEVOIR UN SYSTÈME DE FONDATIONS IMPOSANT POUR UNE STRUCTURE AUSSI LÉGÈRE. LA PRÉSENCE DE LA RIVIÈRE AU RÉGIME TORRENTIEL ET DE SA NAPPE D'ACCOMPAGNEMENT ONT PAR AILLEURS CONDUIT À RÉALISER DES OUVRAGES PROVISOIRES IMPORTANTS POUR MENER À BIEN LA CONSTRUCTION DE CET OUVRAGE.



Viaduc de franchissement
du Giffre

LE CONTEXTE DU FRANCHISSEMENT

Le Département de la Haute-Savoie a lancé au printemps 2015 les travaux du contournement de Marignier/Thyez/Vougy. L'opération consiste à réaliser une voie nouvelle à double sens divisée en 5 tronçons et d'une longueur totale de 5,6 km. Le premier tronçon, actuellement en chantier, s'étend de la RD19 Ouest à la RD26 et comprend la création d'un viaduc de 300 m pour franchir le Giffre (figure 2).

Le projet de contournement a pour objectif de réduire le trafic au cœur des

1- Vue aérienne
de l'ouvrage.

2- Plan du
contournement.

1- Aerial view of
the structure.

2- Drawing of
the bypass.

agglomérations de Marignier, Thyez et Vougy, améliorant ainsi les conditions de circulation et la sécurité. Il permettra notamment de minimiser le trafic de transit pour l'accès aux stations de ski des massifs de la vallée, sans traverser la ville de Cluses.

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE - CONCEPTION

TRACÉ ET DONNÉES FONCTIONNELLES

L'ouvrage a une longueur de 300 m entre lignes d'appuis, permettant d'implanter les culées en dehors du lit

majeur de la rivière. L'axe en plan du tracé est rectiligne au droit du franchissement et le profil en long est circulaire de rayon 7500 m. Le tablier est symétrique par rapport au point haut situé au milieu de l'ouvrage.

La portée des 5 travées est la suivante : 55,5 - 63 - 63 - 63 - 55,5 m (figure 3). Le profil en travers est composé de 2 voies de circulations de 3,25 m de large, d'un TPC de 1,60 m intégrant un séparateur de type MVL et de 2 BDD de 1,75 m, le tout étant encadré par des barrières de type BN1 encastées au hourdis.

L'assainissement se fait via des avaloirs régulièrement espacés qui récupèrent les eaux du caniveau et les déversent dans un collecteur longitudinal suspendu sous les encorbellements du hourdis.

Les rives du tablier sont ornées de corniches architecturales.

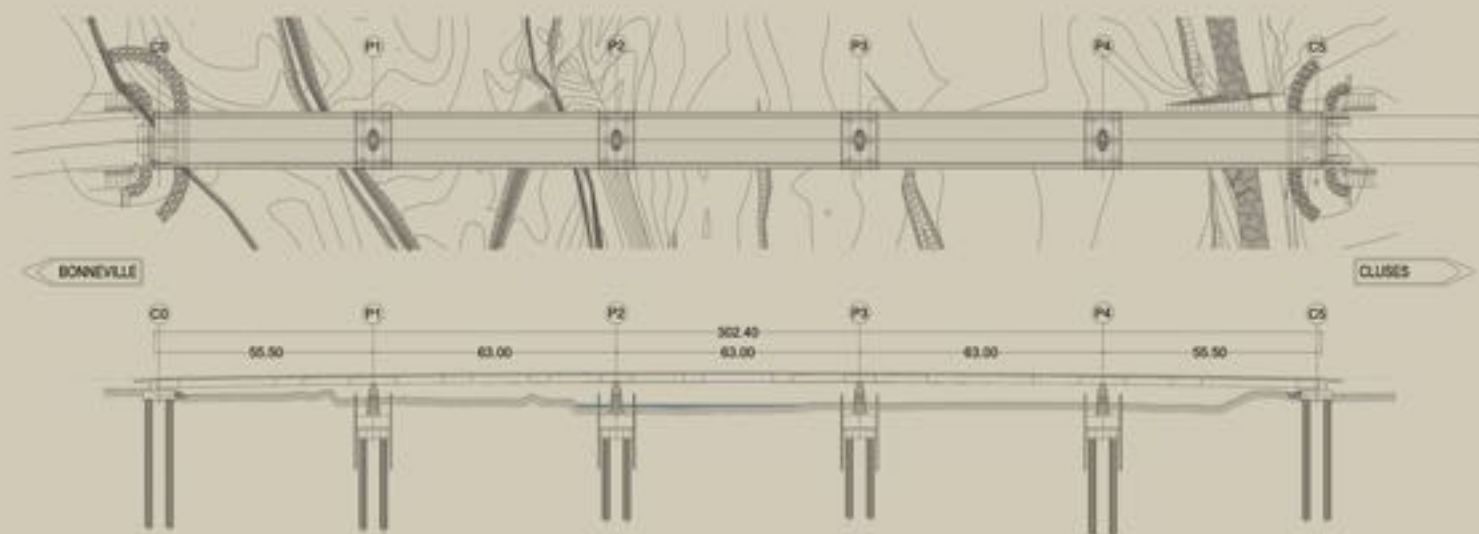
TABLIER

Le tablier est un caisson mixte dont les âmes sont inclinées de 40,7° par rapport à la verticale.

La charpente fait 2 m de haut, la semelle inférieure est large de 4,20 m et les axes des semelles supérieures sont espacés de 7,40 m.

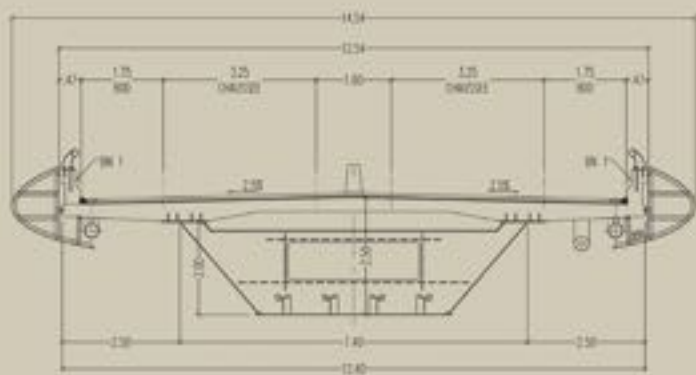
Les tôles longitudinales et les diaphragmes sur piles sont en acier S460, les diaphragmes courants espacés de 3,50 m sont en en acier S355. ▷

VUE EN PLAN ET COUPE LONGITUDINALE DU VIADUC



3

COUPE TRANSVERSALE COURANTE DU TABLIER



4

Chaque diaphragme est évidé pour permettre l'inspection de l'intérieur du caisson.

Le hourdis en béton est d'épaisseur variable de 25 à 42 cm, il a une largeur de 12,40 m (figure 4).

Il reçoit une chape d'étanchéité en feuilles préfabriquées doublée d'une protection en asphalte gravillonné.

APPUIS ET FONDATIONS

L'implantation du lit mineur du Giffre est variable au gré des crues ; cette hypothèse, associée à une profondeur théorique d'affouillement importante, a conduit à enterrer les semelles des piles.

Le risque de liquéfaction des sols sous séisme (sables fins limoneux) a été intégré aux hypothèses pour la justification des fondations. Il se traduit principalement par une diminution de la raideur horizontale et l'introduction d'un frottement négatif sur les pieux.

Pour chaque appui, les fondations sont constituées de 6 pieux de 1,80 m de diamètre.

Leur longueur finale (depuis l'arase inférieure de la semelle) va de 23,30 m pour la pile P3 à 33,20 m pour la culée C0.

3- Vue en plan et coupe longitudinale du viaduc.

4- Coupe transversale courante du tablier.

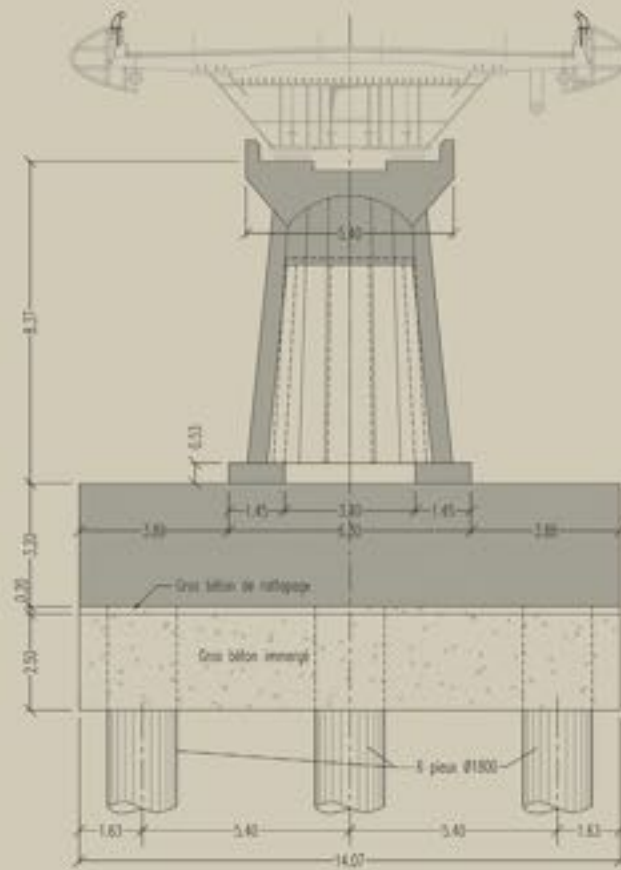
5- Coupe transversale sur pile.

3- Plan view and longitudinal section of the viaduct.

4- Standard cross section of the deck.

5- Cross section on pier.

COUPE TRANSVERSALE SUR PILE



5

© ARCADIS

DÉROULEMENT DES TRAVAUX

LE PLANNING DES TRAVAUX

Le délai contractuel est de 36 mois. Le planning des travaux devait composer avec plusieurs contraintes fortes. Tout d'abord la période habituelle de

Le sommet des culées a une épaisseur de 2,50 m, celui des piles de 3,20 m. Les piles sont creuses au droit du fût et coiffées d'un chevêtre (figure 5). Tous les appuis sont équipés d'appareils d'appui en néoprène fretté et de butées sismiques latérales.



crues du Giffre d'avril à juillet, avec des épisodes majeurs en cas de pluies cumulées à la fonte printanière des neiges d'altitude, puis la période de reproduction des poissons de novembre à mars interdisant tous travaux en rivière et enfin la période hivernale qui selon l'intensité des épisodes neigeux est peu propice à la réalisation de travaux.

Le respect du planning a nécessité une mobilisation soutenue de tous les acteurs dès la notification du marché de travaux en avril 2016, ce afin de pouvoir réaliser et faire valider les études permettant d'engager le forage des pieux en juillet, dont notamment le dimensionnement des appuis au séisme.

6- Plateforme de travail.

7- Vibrofonçage du tube provisoire.

8- Battage des palplanches.

9- Matériel pour terrassement du batardeau.

10- Vue du bouchon réalisé.

6- Work platform.

7- Vibropiling of the temporary casing.

8- Driving sheet piling.

9- Equipment for cofferdam earthworks.

10- View of the completed cap.

TRAVAUX PRÉPARATOIRES

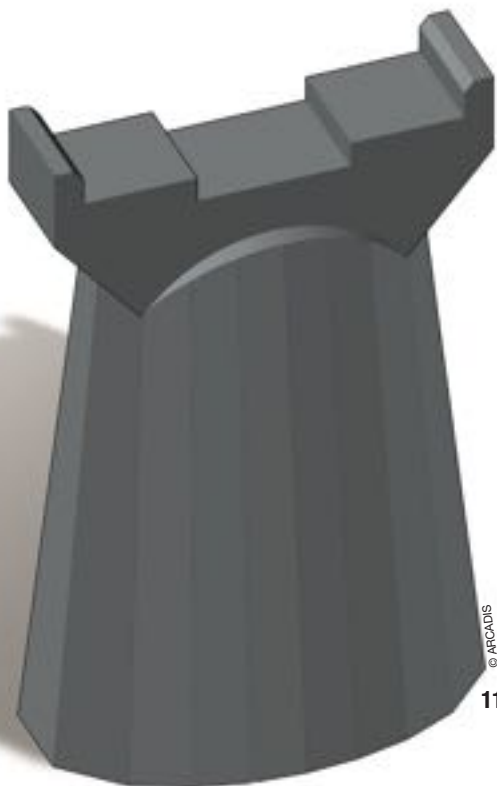
Les travaux ont débuté en juin 2016 par l'aménagement d'une plateforme de travail dans le lit majeur du Giffre. Le niveau de cette plateforme a été calé afin de pouvoir réaliser les travaux à l'abri des crues jusqu'à un niveau correspondant à une crue quinquennale. À cet effet, le lit mineur de la rivière a été canalisé et les plateformes protégées par des enrochements. Afin de limiter l'impact environnemental, la plateforme a été réalisée à l'aide des matériaux alluvionnaires disponibles en abondance dans le lit majeur (figure 6). Les travaux sur les appuis se sont déroulés en enchaînant sur chacun des appuis les ateliers de pieux (de juillet à septembre 2016), puis de fonçage

des palplanches des batardeaux (d'août à octobre 2016), de terrassement et bétonnage du bouchon immergé et enfin d'élévation des culées et des piles (d'août 2016 à avril 2017).

LES PIEUX

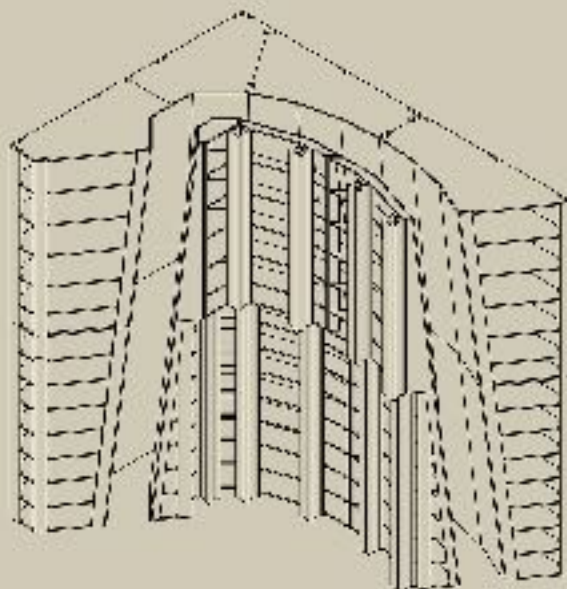
Les pieux des piles ont été forés en diamètre 1,80 m sur une profondeur d'environ 32 m depuis le niveau de la plateforme de travail. Leur réalisation a nécessité l'emploi d'une foreuse de 140 t avec un mât de 26 m et un couple de 59 t.m. Afin d'assurer la tenue des terrains alluvionnaires de surface, un tube provisoire en acier a été vibrofoncé sur une hauteur de 12 m (figure 7), le reste du forage a été réalisé sous boue bentonitique.





© ARCADIS
11

VUE 3D DU COFFRAGE DU FÛT DE PILE



12



13



14

Tous les forages ont pu être réalisés à l'aide de la seule tarière et d'un bucket à fond plat pour le curage du fond de pieu.

Le niveau du bétonnage des pieux des piles a été arrêté à 6 m sous le niveau de la plateforme en prévision d'un recépage après excavation des terrains à l'intérieur des batardeaux. La hauteur restante du forage a été comblée avec un tout-venant avant retrait du tube provisoire. Les cages d'armatures et tubes d'auscultations ont été prolongés

pour faciliter l'auscultation sonore des pieux depuis la plateforme.

Les 3 tronçons élémentaires formant chaque cage d'armatures ont été préfabriqués en usine et acheminés sur site par camion.

La cage entière de 32 m et d'un poids voisin de 6 t ne pouvait pas être levée en un seul élément. Elle a donc été introduite dans le forage en deux fois avec un assemblage intermédiaire en place par soudage des aciers longitudinaux.

11- Vue 3D d'une pile.

12- Vue 3D du coffrage du fût de pile.

13- Coffrage de pile.

14- Pile terminée.

11- 3D view of a pier.

12- 3D view of the pier shaft formwork.

13- Pier formwork.

14- Completed pier.

LES BATARDEAUX

À la suite de l'atelier de pieux, les rideaux en palplanches de type PU18 formant le batardeau ont été foncés au droit de chaque pile (figure 8).

En phase d'exécution, la prise en compte d'un phasage adapté a permis d'optimiser les forces stabilisatrices pour la justification de l'ancrage du batardeau, diminuant ainsi l'épaisseur du bouchon et la profondeur d'excavation. Outre la présence d'eau, la rehausse du batardeau ainsi que la présence



© ARCADIS
15

des cadres, des butons et des pieux à recéper ont rendu difficile l'excavation à la pelle mécanique équipée d'un bras long (figure 9). La présence d'une couche de sol argileux et très compact a conduit à l'emploi d'une petite tarière, nécessaire pour déstructurer les terrains et permettre de dégager les zones confinées entre les pieux et les palplanches. Une inspection finale par des plongeurs a permis de contrôler la qualité du terrassement avant bétonnage du bouchon.

Le bétonnage de chaque bouchon immergé s'est déroulé sur une journée en continu. Afin d'éviter que le béton ne soit délavé, l'extrémité de la manchette a été maintenue dans la masse de béton frais. L'opération a été réalisée à l'aveugle en contrôlant régulièrement le niveau du béton par sondage à l'aide d'un poids et d'un cordeau.

15- About avant fixation de l'avant bec.

16- Vue de dessous de la charpente assemblée.

17- Vue de dessus de la charpente assemblée.

15- End piece before fastening the launching nose.

16- Bottom view of the assembled framework.

17- Top view of the assembled framework.

Les batardeaux ont ensuite été vidés et nettoyés pour permettre le recépage des pieux et la réalisation d'un complément de bouchon, complément d'une épaisseur moyenne de 20 cm ayant pour objectif d'obtenir une surface régulière pour la réalisation de la semelle (figure 10).

Les eaux de pompage étant particulièrement chargées en sédiments, des bassins de rétention et des filtres ont été aménagés pour les traiter avant rejet dans le milieu naturel.

LES APPUIS

Les culées de l'ouvrage sont de conception classique. Le niveau de l'arase inférieure du chevêtre a permis de les réaliser sans devoir mettre en œuvre un batardeau. Le garde-grève de la culée en rive gauche a été réalisé après lançage de la charpente.

Bien que les calculs théoriques de montée en température n'en démontreraient pas la nécessité, les semelles massives des piles d'une épaisseur de 3,20 m ont été bétonnées en deux phases. Cela a permis d'éliminer tout risque d'apparition de RSI (réaction sulfatique interne), phénomène lié à la montée en température lors de la prise du béton.

Chaque pile (figure 11) a été réalisée en deux phases :

- Une première phase pour la construction du fût (figure 12), coffré avec un coffrage bois conçu spécialement pour le chantier. La forme architecturée du fût, avec sa partie intérieure creuse notamment, a naturellement conduit à l'emploi de ce type de coffrage (figure 13) ;
- Une deuxième phase après mise en œuvre d'une prédalle faisant office de coffrage perdu en tête de fût pour la réalisation du chevêtre plein.

Afin de pouvoir utiliser un seul outil coffrant, la hauteur des fûts a été uniformisée en mettant en œuvre une rehausse rectangulaire sur la semelle des deux piles les plus hautes (P2 et P3).

Les butées sismiques ont été réalisées en même temps que les bossages d'appui (figure 14).

LE TABLIER

Le caisson métallique du tablier mesure 301,60 m de longueur, 8,20 m de largeur et 2,00 m de hauteur, pour un poids total de 1070 t. Il a été préfabriqué en usine par tronçons dont la géométrie et le poids devaient être compatibles avec les gabarits de transport routier. Ainsi la charpente métallique a été découpée en 26 demi-tronçons de 18,90 m à 27,60 m de longueur (figure 15).



© ARCADIS
16



17



18



19



20



21

Ces tronçons ont été acheminés sur site, assemblés et soudés sur une plateforme à l'arrière de la culée C5 en rive gauche du Giffre (figures 16 et 17). La charpente est munie d'une protection anticorrosion de type C4NV. Les couches primaires et intermédiaires ont été appliquées en atelier avant transport sur site. La couche de finition a été entièrement appliquée sur site. Le lançage s'est effectué en 4 phases au moyen d'un système de traction et de retenue. Le système de traction était composé d'un treuil 9/12 t, d'un point fixe et d'un point mobile. Le treuil de retenue permet de maîtriser avec une meilleure précision l'avancement de la structure.

Un avant-bec de 36 m a été utilisé dès la première phase de lançage pour permettre le franchissement des travées de 55,50 m et 63,30 m (figure 18). Afin d'optimiser le planning, l'avant-bec a été démonté avant la dernière

phase de lançage après accostage sur P1. Pour que la charpente résiste à cette ultime phase de lançage sans avant-bec, un appui provisoire intermédiaire entre C0 et P1 a été réalisé (figure 19). Le démontage de l'avant-bec avant accostage sur la culée a ainsi permis d'anticiper la construction du mur garde-grève, de monter le remblai contigu et de réaliser la plateforme d'assemblage et de lançage des cages d'armatures du hourdis.

Après accostage sur C0, la charpente métallique a été descendue sur des appuis provisoires de bétonnage de même épaisseur que les appuis définitifs.

Préalablement au bétonnage du hourdis, les cages d'armatures ont été préfabriquées et lancées sur la charpente. Les cages de ferrailage ont été réalisées par plots de 12 m sur un gabarit à l'arrière C0. Chaque plot comprenait les armatures des murets de BN1 qui

18- Lançage de la charpente.

19- Appui intermédiaire pour démontage anticipé de l'avant-bec.

20- Lançage des cages d'armatures du hourdis.

21- Équipage mobile.

18- Launching the framework.

19- Intermediate support for early dismantling of the launching nose.

20- Launching the deck section reinforcement cages.

21- Mobile rig.

équipent les rives de l'ouvrage. Ces dernières constituaient un poids mort relativement important pour les armatures transversales du hourdis en cours de lançage et ont nécessité de raidir les cages.

Le ferrailage a été lancé par tronçons de 24 m, soit environ 25 t, à l'aide de 2 chariots mobiles tractés par 2 treuils positionnés à l'axe des semelles supérieures du caisson métallique (figure 20).

Lorsque les cages sont au droit de leur position définitive, elles sont levées à l'aide de palans et de chaises afin de pouvoir libérer les chariots, puis elles sont posées sur la charpente.

Le hourdis a ensuite été coulé en place sur équipage mobile. Ce dernier est composé de coffrages métalliques sous les encorbellements et d'un plateau bois en partie centrale. Le plateau central a été spécialement réalisé pour les besoins du chantier.



22

© ARCADIS

Il a été nécessaire d'abaisser les semelles supérieures des diaphragmes sur pile par rapport au projet afin de permettre le passage du plateau d'une travée à l'autre (figure 21). Le hourdis a été bétonné par plots de 12 m environ selon la technique du pianotage. Après le bétonnage, le tablier a été mis sur ses appuis définitifs (figure 22). □

22- Vue d'ensemble du tablier.

22- General view of the deck.

LE CHANTIER EN QUELQUES CHIFFRES

COÛT DES TRAVAUX : 11,6 millions d'euros

DURÉE DES TRAVAUX : 36 mois

PRINCIPALES QUANTITÉS MISES EN ŒUVRE :

• **Tablier :**

- Charpente métallique : 1 000 t
- Hourdis béton : 1 200 m³
- Armatures hourdis : 330 t

• **Appuis et fondations :**

- Béton immergé : 1 500 m³
- Béton des piles et culées 2 700 m³
- Armatures : 260 t

INTERVENANTS DU PROJET

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Conseil département de Haute-Savoie

GROUPEMENT DE MAÎTRISE D'ŒUVRE :

- Arcadis (mandataire)
- Uguet (réseaux)
- Strates (architecture)
- Fontaine (paysage)

MANAGEMENT ENVIRONNEMENTAL : Reflex Environnement - Sea

CSPS : Beccs

GROUPEMENT D'ENTREPRISES :

- Demathieu Bard (mandataire) → Génie-civil
- Berthold (charpente métallique)
- Benedetti-Guelpa (terrassements)
- Soletanche Bachy (pieux)

ÉTUDES D'EXÉCUTION :

- Cogeci (génie-civil)
- Briva (charpente métallique)
- Sioah (batardeaux)

SOUS-TRAITANTS PRINCIPAUX :

- Dfc battage (batardeaux en palplanches)
- Cepaba (armatures)

ABSTRACT

VIADUCT CROSSING THE GIFFRE AT MARIGNIER (74)

BERTRAND LOUPPE, ARCADIS - GUILLAUME FERNANDEZ, ARCADIS - JÉRÉMY CATTET, ARCADIS - NICOLAS FAURE-VINCENT, DEMATHIEU BARD

Construction work on the viaduct crossing the Giffre in the middle valley of the Arve is nearing completion, and commissioning is scheduled for end-2018 at the latest. This remarkable link on the Marignier-Thyez bypass will help to improve traffic conditions and user safety. The main works, including, in particular, the execution of piles 1.8m in diameter over a drilling length of more than 35m, have been carried out without any major incident. This bridge structure, resting on rugged supports and foundations designed to allow for the risk of liquefaction due to earthquake, has a refinement and elegance which ensure optimal integration into a remarkable natural beauty spot. □

VIADUCTO DE CRUCE DEL GIFFRE EN MARIGNIER (74)

BERTRAND LOUPPE, ARCADIS - GUILLAUME FERNANDEZ, ARCADIS - JÉRÉMY CATTET, ARCADIS - NICOLAS FAURE-VINCENT, DEMATHIEU BARD

Las obras de construcción del viaducto de cruce del Giffre en el valle medio del Arve tocan a su fin. Este importante eslabón de la circunvalación de Marignier-Thyez, que a más tardar entrará en servicio a finales de 2018, contribuirá a mejorar las condiciones de circulación y la seguridad de los usuarios. Las obras principales, que incluyen la realización de pilotes de 1,8 m de diámetro sobre una longitud de perforación de más de 35 m, se habrán llevado a cabo sin incidentes destacables. Soportada por unos sólidos apoyos y unos cimientos cuyo diseño prevé el riesgo de licuefacción por sismo, la finura y la elegancia de esta obra de fábrica garantiza una inserción óptima en un impresionante paraje natural. □



1

© CONSEIL DÉPARTEMENTAL 44

LE RENOUVEAU DU GRAND PONT DE THOUARÉ-SUR-LOIRE

AUTEURS : SERGE JAFFRELO, CHEF DU SERVICE OUVRAGES D'ART, DÉPARTEMENT DE LOIRE ATLANTIQUE - THOMAS DUPEYROUX, INGÉNIEUR, DÉPARTEMENT DE LOIRE ATLANTIQUE - KAMIL BUKOWSKI, DIRECTEUR DU PÔLE INFRASTRUCTURES, OUVRAGES D'ART - THAO NGUYEN, CHEF DE PROJET, ARTELIA VILLE ET TRANSPORT - JEAN MIFSUD, RESPONSABLE TRAVAUX, BOUYGUES TPRF

LE PROJET DE RÉALISATION D'UNE DALLE EN BFUP DE 2400 m² POUR 9 cm D'ÉPAISSEUR SUR UNE CHARPENTE MÉTALLIQUE DE 1882 DEVAIT PERMETTRE DE LA RÉPARER EN L'ALLÉGEANT DE 50 % POUR RENDRE POSSIBLE L'AJOUT D'ENCORBELLEMENTS CYCLABLES. LE CHANTIER A VALIDÉ LE CONCEPT ET OPTIMISÉ LE PROCÉDÉ CONSTRUCTIF GLOBAL, MALGRÉ L'EXIGUÏTÉ DU SITE, POUR RÉALISER EN SIX MOIS LA PLUS GRANDE DALLE DE PONT EN BFUP D'EUROPE. EN ALLIANT PATRIMOINE ET INNOVATION, LE DÉPARTEMENT DE LOIRE ATLANTIQUE TENTE DE RÉPONDRE AUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ACTUELS ET RENOUVELLE L'APPROCHE EN MATIÈRE DE RÉHABILITATION DE STRUCTURE MÉTALLIQUE.

LE CONTEXTE/DESCRIPTION ET PATHOLOGIES

En amont immédiat de Nantes, le Grand pont et le pont du Haut Village, séparés par l'île de la Chénaie, permettent depuis 1882 le franchissement de La Loire par la RD37 entre Thouaré-sur-Loire et Saint-Julien-de-Concelles, en site classé Natura 2000.

Le pont du Haut Village, long de 225 m et reconstruit après faits de guerre en charpente métallique de type Warren avec hourdis béton, a été réparé en 2006, sans remise en peinture.

Le Grand pont, avec son tablier métallique d'origine, de type cage en treillis,

présente une longueur de 392 m, décomposée en sept travées de 45 m et deux travées de rive de 38,25 m. Cette charpente en fer puddlé est constituée de cornières et tôles de petites dimensions assemblées par rivetage. Des pièces de pont, de type I 500 reconstitué et espacées de 1,80 m, supportent des voûtains en briques. Le Grand pont accueille une chaussée de 4,60 m de largeur à deux voies, bordée de trottoirs de 0,77 m. Il supporte aujourd'hui un trafic fortement pendulaire de 10 500 véhicules par jour. Ses charges routières sont limitées aux véhicules de moins de 3,5 t, comme

1- Le Grand Pont de Thouaré-sur-Loire, après travaux.

1- The large bridge of Thouaré-sur-Loire, after the works.

en traversée du bourg de Thouaré-sur-Loire, avec des dérogations à 8 et 16 t (usage agricole et services publics), l'ouvrage ayant été dimensionné pour des chariots de 8 t.

Une ligne de pont jumelle, constituée de deux ouvrages de 482 et 90 m, est située 5 km en amont à Mauves-sur-Loire.

Le tablier du Grand pont a fait l'objet d'un entretien régulier mais limité à sa protection anticorrosion, la dernière datant de 1987.

Cet ouvrage présente des pathologies graves dues à une absence d'étanchéité : les eaux de pluie ruissellent le long des bordures de trottoirs, s'infiltrant dans le remblai et percolent à travers le mortier de chaux jusqu'aux voûtains en briques. Il s'en suit, au fil des années, un délavement du hour-

dage et un délitement des briques, accentué par les cycles de gel-dégel. On peut surtout constater la forte corrosion des pièces de pont, localisée le long du tympan du voûtain, avec une importante perte de matière et des perforations fréquentes et étendues. Compte tenu du risque d'effondrement d'un voûtain ou de rupture d'une pièce de pont, l'ouvrage a été placé sous surveillance renforcée 3U et un programme de réparation établi fin 2014, accompagné des premières décisions budgétaires.

LE PROGRAMME

Le programme initial du gestionnaire prévoyait la réparation des voûtains et pièces métalliques défectueuses, la réalisation d'une étanchéité sur forme en béton et à sa remise en peinture.

2- Coupe transversale de projet avec encorbellements - solution dalle BA.

3- Coupe transversale de projet sans encorbellements - solution dalle BFUP + PRS mixte.

2- Cross section of project with cantilever structures: reinforced concrete slab.

3- Cross section of project with cantilever structures: UHPFRC slab + composite welded plate girder.

L'enveloppe affectée à ces travaux s'établissait à 4,8 M€ H.T. assortie d'un délai de réalisation de 12 mois sous coupure de la circulation, et 1,2 M€ HT pour la remise en peinture du pont du Haut village.

Le porté à connaissance de l'opération a suscité de nombreuses réactions quant à la nécessité et la durée de la fermeture du Grand pont, les besoins en circulations douces en traversée de Loire, voire la reconstruction d'une ligne de ponts neufs. Cette dernière éventualité fut écartée, faute de financement à moyen terme et d'emplacement satisfaisant en termes d'aménagement et de protection de l'environnement. S'en est suivie une hiérarchisation des exigences attachées au projet : respect du coût, optimisation et sécurisation du délai de coupure, confirmation de la

volonté de réaliser ultérieurement deux encorbellements dédiés aux circulations actives, de 2 m de largeur utile chacun en circulation monodirectionnelle. Le programme des charges d'exploitation a été redéfini : une charge répartie de 1240 daN/m de tablier (deux files de véhicules de 3,5 t), le croisement de deux véhicules de 8 t (2+6), un autobus urbain isolé de 19 t (6+13), une charge accidentelle de deux véhicules de 12 t (4+8) se croisant, les encorbellements étant dimensionnés conformément aux eurocodes.

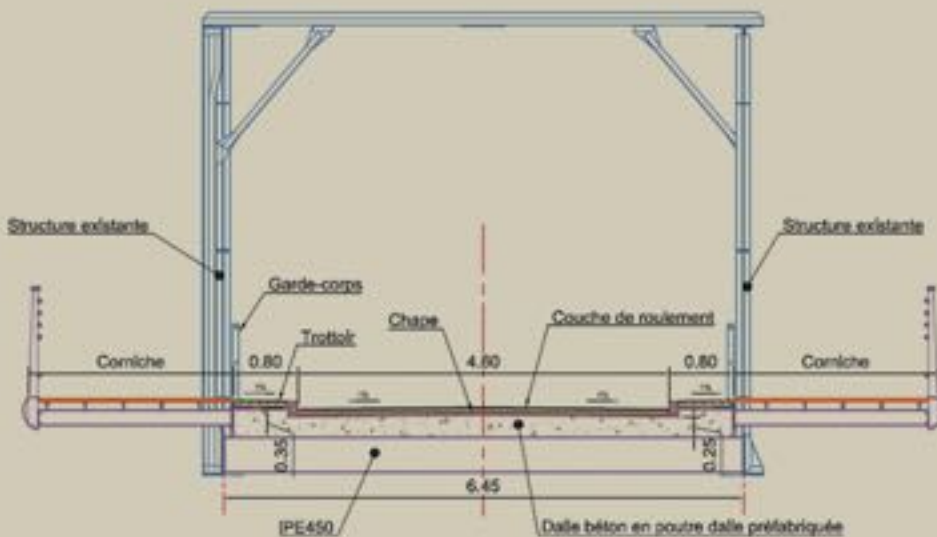
LA CONCEPTION

D'évidence, la réparation des voûtains ou leur remplacement par une dalle en béton armé, ne dégageait pas une réserve de capacité portante suffisante pour accueillir les piétons et cycles sur l'ouvrage. Il fallait donc imaginer un nouveau procédé constructif, répondant à nos exigences structurelles (fort gain de poids propre, possibilité de fixation des encorbellements), et géométriques (maintien du niveau de la chaussée actuelle) tout en sécurisant le coût et le délai (doublement systématique des pièces de pont sans toucher aux assemblages existants).

L'idée d'utiliser le BFUP (Béton Fibré Ultra Performant) pour ses qualités mécaniques répondait aux deux premières exigences, en réalisant une dalle continue de pleine largeur et de 9 cm d'épaisseur constante reposant sur les pièces de pont. Revêtue d'une résine gravillonnée et positionnée au niveau actuel de la chaussée, elle dégage un espace de 20 à 25 cm au-dessus de la pièce de pont existante qui permet d'y insérer un profilé métallique neuf indépendant, boulonné sur les extrémités saines des pièces de pont. ▶

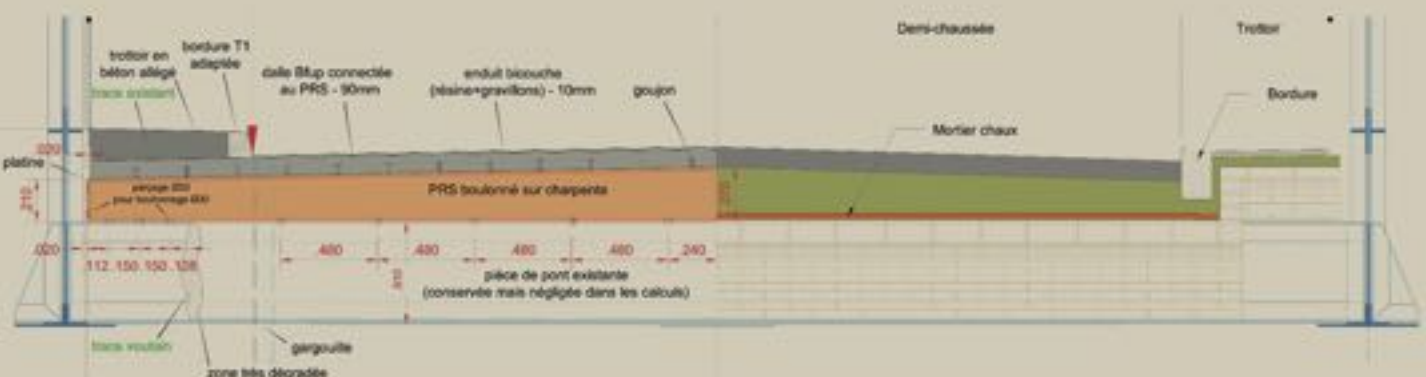
© ARTELIA

COUPE TRANSVERSALE DE PROJET AVEC ENCORBELLEMENTS - SOLUTION DALLE BA



2

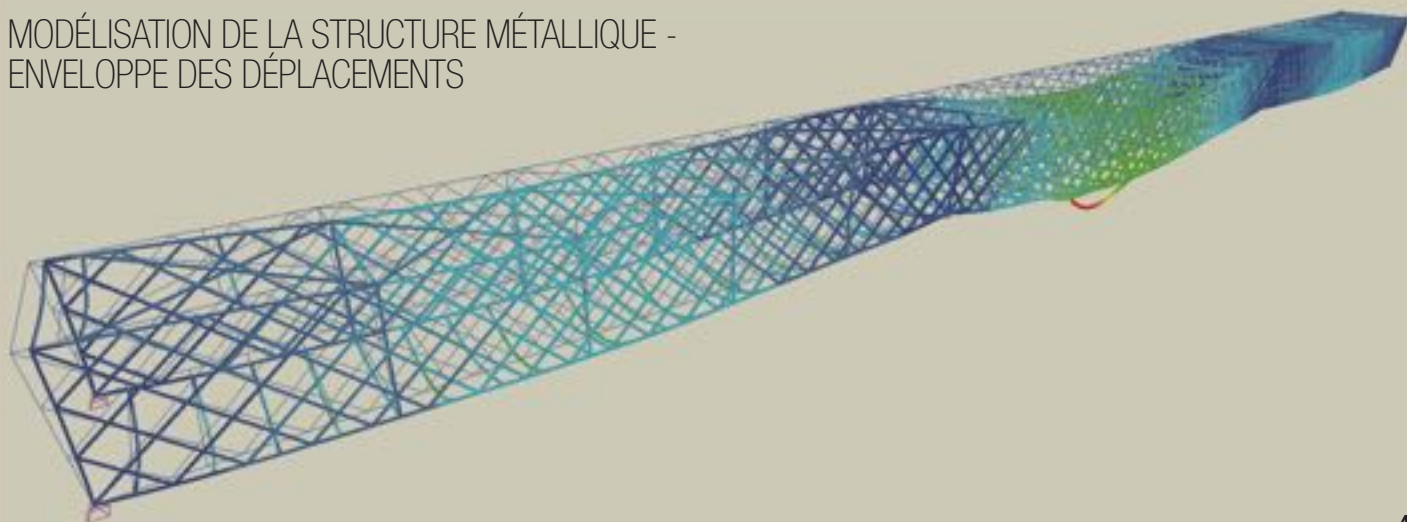
COUPE TRANSVERSALE DE PROJET SANS ENCORBELLEMENTS - SOLUTION DALLE BFUP + PRS MIXTE



3

© CONSEIL DÉPARTEMENTAL 44

MODÉLISATION DE LA STRUCTURE MÉTALLIQUE - ENVELOPPE DES DÉPLACEMENTS



4

© ARTELIA

Étant truffée de connecteurs Nelson, son fonctionnement en section mixte acier-BFUP optimise ses dimensions et lui permet de reprendre seul les charges d'exploitation. Une platine soudée à chaque extrémité permettra la fixation des consoles pour encorbellements.

À ce stade des études, le délai pour réaliser les travaux sous coupure était estimé à 7 mois, minimisant d'autant la gêne aux usagers et les allongements de parcours, à budget constant.

La mise à nu de la charpente métallique permet sa protection anticorrosion intégrale et l'allègement de moitié du poids propre la soulage de manière pérenne.

Grâce à sa forte compacité et sa très faible porosité, gages d'une grande durabilité, aucun entretien n'est requis sur la dalle en BFUP. La durée de vie de l'ouvrage s'en trouve grandement prolongée.

L'ensemble de ces considérations permet d'affirmer que le concept développé présente une empreinte environnementale et un bilan carbone nettement meilleurs que les solutions traditionnelles.

En lien avec Nantes Métropole, futur gestionnaire du Grand pont à l'issue du dernier processus de décentralisation, le Département de Loire atlantique a multiplié les instances de concertation et d'information : comités d'élus et de représentants du tissu socio-économique, réunions publiques...

Le caractère innovant du projet et les efforts consentis pour pérenniser les ouvrages et réduire l'impact du chantier ont permis de dégager un consensus et de valoriser l'image de la collectivité.

LES MODÉLISATIONS ET DIMENSIONNEMENTS

Le Département de Loire Atlantique a missionné Artelia pour l'étude de différents scénarios de vérification et de réparation du Grand Pont, comprenant :

- Le relevé sur site des travées C1-P1 et P1-P2 (conjointement avec Veritas) suivi de la vérification de la stabilité de l'état existant ;
- L'étude de remplacement des voûtains par des dalles préfabriquées en béton armé, des pièces de pont par des nouveaux profilés

4- Modélisation de la structure métallique - enveloppe des déplacements.

5- Vue éclatée de la modélisation 3D par Cogeci.

4- Model of the steel structure - range of movements.

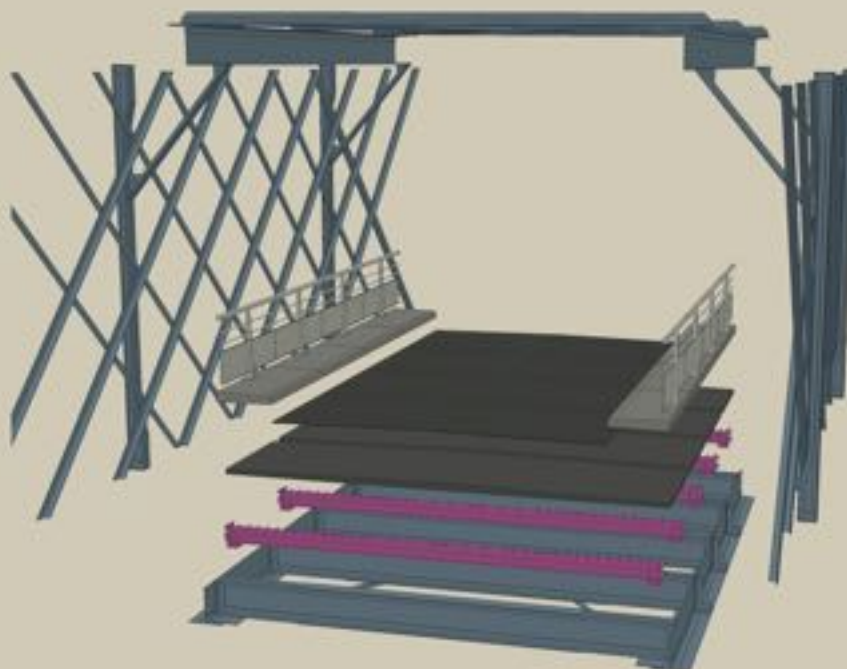
5- Exploded view of 3D model by Cogeci.

industriels, ainsi que de l'ajout des encorbellements ;

→ L'étude de remplacement des voûtains par des dalles en BFUP, supportées par l'ensemble des nouveaux profilés industriels et pièces de pont existantes ;

→ L'étude de remplacement des voûtains par des dalles en BFUP, supportées que par des nouveaux profilés PRS aux dimensions optimisées par la prise en compte de la flexion transversale ;

VUE ÉCLATÉE DE LA MODÉLISATION 3D PAR COGECI



5

© CONSEIL DÉPARTEMENTAL 44



directement aux extrémités des dalles de trottoirs (figure 2).

L'utilisation des dalles en BFUP a permis un allègement de la structure encore plus significatif, autorisant l'ajout des encorbellements, tout en prenant en considération les charges du programme. Les dalles en BFUP, d'épaisseur constante de 9 cm, étaient appuyées sur les PRS de hauteur variable. Le clavetage des dalles comprenait des goujons permettant au PRS de travailler en section mixte dans le sens transversal (figure 3).

Pour chaque scénario d'étude, une vérification de la stabilité globale de la charpente métallique en 3D a été effectuée sous le logiciel Graitec Advance, avec les dimensions géométriques relevées sur site (figure 4).

L'étude des encorbellements avec des différentes solutions de platelage (en BFUP, bois, tôle ou caillebotis) a été réalisée afin de déterminer l'enveloppe des efforts apportés. Les encorbellements prévus ultérieurement auraient une largeur utile de 2 m, et prendraient appui sur les consoles espacées de 1,8 m.

- La vérification de la stabilité globale de la charpente métallique en 3D de 3 travées pour chaque cas d'étude ;
- L'étude des encorbellements avec différentes solutions de platelage (BFUP, bois, tôle ou caillebotis en acier) et détermination de l'enveloppe des efforts de sollicitations.

La vérification de l'état existant a montré que le passage d'un camion de 12 t était admissible sur l'ouvrage mais que le passage d'un camion de 16 t nécessitait des renforcements de la structure. Le remplacement des voûtains par des dalles préfabriquées en béton armé aurait permis un allègement de

- 6- Platelage continu en intrados et échafaudages mobiles.**
- 7- Fraisage des enrobés.**
- 8- Démolition des trottoirs.**

- 6- Continuous decking on intrados and mobile scaffolding.**
- 7- Cold planing of asphalt.**
- 8- Demolition of footpaths.**

la structure rendant possible l'ajout des encorbellements avec le passage concomitant d'un seul camion de 12 t sur l'ouvrage. Les dalles préfabriquées (tablier d'épaisseur de 25 cm et trottoir d'épaisseur 35 cm) ont été modélisées comme des éléments isostatiques de 1,80 m de portée, simplement appuyés sur les nouvelles pièces de pont en profilés industriels. Les pièces de pont, de 6,45 m de portée, en IPE 450 (ou HEA 500) ont été étudiées simplement appuyées sur les membrures inférieures de la charpente métallique. Les consoles des encorbellements, espacées de 1,80 m, étaient fixées

LA CONSULTATION DES ENTREPRISES

En phase d'appel d'offres, les deux collectivités se sont accordées pour définir et valoriser les critères de sélection : le prix (50%), la valeur technique (35%) et l'insertion (5%) mais également le délai proposé par le soumissionnaire pour 10% de la note globale. Chaque candidat devait répondre à la solution de base (délai de coupure : 7 mois) et pouvait présenter des variantes uniquement sur le délai exprimé en mois, avec des valeurs entières comprises entre 3 et 7 mois. ▷





9

© BYTPRF

Potentiellement, le maître d'ouvrage pouvait engager jusqu'à 600 000 € de plus que le montant de l'offre moins-disante pour retenir l'offre la plus courte. Les clauses administratives prévoyaient en contrepartie une pénalité égale au double de la bonification lors de l'appel d'offres assortie d'une prime d'avance équivalente.

Parmi les 4 offres reçues, 2 proposèrent un délai réduit à 6 mois, dont l'offre de l'entreprise Bouygues Travaux Publics Régions France déclarée attributaire.

LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

L'optimisation économique, suggérée par le maître d'œuvre, a conduit à réaliser un profilé métallique d'inertie constante à partir d'un profilé standard élargi et renforcé. La dalle en BFUP doit alors reprendre la forme de dévers de la chaussée et présente une épaisseur variant de 7 cm en rive à 11,7 cm dans l'axe de l'ouvrage. Cette nouvelle disposition permet de préfabriquer ces dalles à l'envers pour avoir une surface libre horizontale favorable au caractère autoplaçant non thixotrope du BFUP de marque Smart'Up fourni par Vicat (figure 5).

LA PRÉPARATION DES TRAVAUX

Durant les 3 mois de préparation, les méthodes du chantier ont été rigoureusement définies :

→ Pour mutualiser les moyens d'accès aux postes de travail et de protection en toute sécurité, le confinement étant imposé par les contraintes environnementales ;

→ Pour garantir l'approvisionnement des zones de chantier en permanence, malgré l'effet de corridor, les difficultés liées à la limitation en charges des ouvrages et la géométrie fermée de la cage peu propice aux manutentions.

En effet, la densité des travaux représentait un investissement de 1 M€ par mois, supérieure à celle d'un collège en construction, avec couramment un effectif de 50 compagnons sur le chantier. Un relevé topographique de l'ouvrage

9- Peinture de la charpente métallique.

10- PRS boulonné sur la pièce de pont existante.

9- Painting the steel structure.
10- Welded plate girder bolted onto the existing transverse girder.

par scanner 3D a été réalisé de manière à éviter les conflits en phase de reconstruction et alimenter la maquette numérique de récolement.

LA RÉALISATION DES TRAVAUX

Pour respecter le délai annoncé, le chantier a été organisé en trois phases bien distinctes, menées successivement depuis la rive droite vers l'île :

- La déconstruction ;
- La protection anti corrosion ;
- La reconstruction.



10

© CONSEIL DÉPARTEMENTAL 44



11

© BYTPRF

La mutualisation des moyens d'accès et le confinement, imposés pour protéger l'environnement, ont conduit à réaliser préalablement un platelage continu sous le tablier, en temps masqué (figure 6).

L'ouvrage a ensuite été instrumenté à l'aide de cordes optiques pour s'assurer que les sollicitations dans la charpente restent acceptables lors des phases transitoires.

Dès la coupure de la circulation, l'enrobé a été raboté, les trottoirs démolis, la chaussée décaissée, les matériaux de remplissage du hourdis déblayés puis les voûtains en briques déconstruits (figures 7 et 8).

Ces matériaux, exempts d'amiante et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, ont pu être réemployés à la réalisation de chemins à proximité. Les garde-corps et la tôle de rive ont été déposés à l'avancement.

Mise à nue sur les premières travées, la charpente a pu être décapée et remise en peinture à l'aide de deux échafaudages complémentaires, formés de portiques roulants et clos : la présence de plomb identifiée lors des diagnostics a nécessité des installations particulières avec mise en place de sas, d'extracteurs d'air, etc. Le traitement anticorrosion, validé lors d'essais de

11- PRS et dalles BFUP en place.

12- Platine d'about du PRS pour futur encorbellement et dalles BFUP.

11- Welded plate girder and UHPFRC slabs in place.

12- End plate of welded plate girder for future cantilever and UHPFRC slabs.

convenance, consista en un avivage des surfaces (sauf la pièce de pont décapée Sa2,5) suivie de l'application du nouveau système de peinture (2 couches époxy et une finition polyuréthane, teinte RAL 5014 bleu pigeon). Pour permettre le séchage des différentes couches de peinture en temps masqué, deux travées étaient simultanément traitées par pianotage et une troisième en préparation (figure 9). En parallèle, la fabrication en série des profilés reconstitués soudés (PRS) et des dalles préfabriquées en BFUP,

confiée à des PME locales, avançait rapidement. Conformément à la norme NF P 18-470 sur le produit BFUP, une épreuve de convenance fut menée préalablement sur une première dalle. Aussitôt après la remise en peinture des premières travées, la phase de reconstruction a pu alors débuter par la mise en place précise des PRS et leur boulonnage sur la pièce de pont existante. Les dalles préfabriquées étaient approvisionnées une par une à pied d'œuvre dans l'exiguïté de la cage, puis posées à l'aide d'un engin léger sur pneu. Ces opérations répétitives se devaient d'être réalisées avec le plus grand soin pour ne pas heurter la charpente existante, tout en respectant la cadence prévue au planning (figures 10, 11 et 12).

Lorsqu'une dizaine d'éléments étaient en place, les dalles et PRS étaient liaisonnés les uns aux autres par un clavetage coulé en place, composé du même BFUP.

Après pesage de chacun de ses constituants, à savoir le premix, les fibres, l'adjuvant et l'eau, le protocole de malaxage au pied du pont se déroulait en deux séquences, les fibres n'étant introduites qu'après obtention d'une pâte hydratée, permettant d'aboutir à un mélange conforme. ▷

© CONSEIL DÉPARTEMENTAL 44



12

Chaque gâchée prédosée permettait le coulage d'un clavetage entier, en progressant d'une extrémité vers l'autre sans interruption, assurant ainsi une bonne orientation des fibres dans l'encombrement des connecteurs et aciers de liaison, et l'absence de strates.

La difficulté de ce cycle de travail consistait à anticiper l'allongement de parcours de l'engin transportant le mélange, lié à la progression du chantier dans la cage, tandis que les équipes acquéraient des automatismes par répétitivité. Ce mode opératoire a fait l'objet d'essais préalables avec suivi de la rhéologie (figure 13).

La réalisation des 800 m de trottoirs et la mise en œuvre des garde-corps ont pu débuter dès lors que le nouveau tablier était suffisamment long et s'achever avec la pose des joints de chaussée et de trottoirs. Il ne restait plus, ensuite, qu'à appliquer manuellement l'enduit en résine sablée, très sensible aux conditions météorologiques, sur les dalles pour permettre la circulation routière (figure 14).

PRINCIPALES QUANTITÉS

**MONTANT DU MARCHÉ Y COMPRIS TRANCHE CONDITIONNELLE :
6 millions d'euros**

**DÉLAI D'EXÉCUTION DU MARCHÉ (SOUS COUPURE DE CIRCULATION)
PLUS 3 MOIS DE PRÉPARATION : 6 mois**

LONGUEUR DU GRAND PONT : 392 m

**NOMBRE DE PROFILÉS RECONSTITUÉS SOUDÉS
ET DE DALLES BFUP : 218**

**QUANTITÉ DE BFUP UTILISÉ POUR LE CHANTIER :
500 t (dont 65 t coulées en place pour les clavages)**

ÉPAISSEUR MOYENNE D'UNE DALLE BFUP : 9 cm

La qualité des travaux exécutés allée au strict respect du planning a conduit à réceptionner les ouvrages le 18 août 2017, avec 10 jours d'avance, ce qui a permis la réalisation de travaux connexes (hors marché) : repose sur le tablier des réseaux déviés, marquage au sol, inspection détaillée « point zéro » et principalement l'aménagement de la voirie d'ac-

cès au pont par Nantes Métropole. L'inauguration par le président du Département de Loire-Atlantique a eu lieu, conformément aux engagements pris devant la population, en soirée du 25 août 2017.

CONCLUSION

Cette réalisation réussie a permis de valider un concept novateur et d'en-

trevoir beaucoup d'autres applications concrètes.

Nombreux sont les ouvrages métalliques limités en charge dont on doit pour des questions esthétiques ou d'exploitation conserver la charpente ancienne en recherchant une amélioration de la capacité portante (ouvrages urbains notamment ou pourquoi pas ferroviaires). Les structures neuves de type Warren ou Bow String se prêtent également à ce mode constructif si le poids propre et la durabilité sont prépondérants.

De nombreuses présentations de l'opération ont été réalisées lors de journées techniques et de colloques internationaux dont UHPFRC 2017 à Montpellier en octobre dernier.

13- Dalles clavées.

13- Keyed slabs.





14

© BYTPRF

D'ores et déjà, il est prévu de dupliquer cette solution technique sur les ponts de Mauves-sur-Loire à partir de 2019.

Ce concept fait l'objet d'une extension dédiée aux structures à poutres métalliques multiples, comme les ponts métalliques de portée modeste mais présents en grand nombre sur les routes, ou dans les bâtiments centenaires. □

14- Vue de l'ouvrage avant réouverture.

14- View of the bridge before reopening.

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE ET MAÎTRE D'ŒUVRE : Conseil Départemental 44
ASSISTANCE À MAÎTRISE D'ŒUVRE (dimensionnements et VISA) : Artélia
ENTREPRISE EN CHARGE DES TRAVAUX :
 Bouygues Travaux Publics Régions France
PRÉFABRICANT DES DALLES EN BFUP : Jousselin
FOURNISSEUR DU BFUP SMART-UP : Vicat

ABSTRACT

RENOVATION OF THE LARGE BRIDGE OF THOUARÉ-SUR-LOIRE

SERGE JAFFRELO, DÉPARTEMENT DE LOIRE ATLANTIQUE - THOMAS DUPEYROUX, DÉPARTEMENT DE LOIRE ATLANTIQUE - KAMIL BUKOWSKI, OUVRAGES D'ART - THAO NGUYEN, ARTELIA VILLE ET TRANSPORT - JEAN MIFSUD, BOUYGUES TPRF

Given the severe disorders affecting the large bridge of Thouaré-sur-Loire, the Loire-Atlantique "département" designed an innovative project with a 2400m² thin slab in UHPFRC, the biggest in Europe, to replace the brick jack arches, completely repaint the steel structure dating from 1882 and reduce the deck weight by 50%, allowing the addition of cantilever structures for cyclists. The incorporation of a new transverse girder connected to the composite cross section and the massive use of prefabrication helped speed up the construction process, so that site works were performed in six months without a hitch. This project opens up new prospects for old steel structures of bridges and buildings, in response to current environmental challenges. □

LA RENOVACIÓN DEL GRAN PUENTE DE THOUARÉ-SUR-LOIRE

SERGE JAFFRELO, DÉPARTEMENT DE LOIRE ATLANTIQUE - THOMAS DUPEYROUX, DÉPARTEMENT DE LOIRE ATLANTIQUE - KAMIL BUKOWSKI, OUVRAGES D'ART - THAO NGUYEN, ARTELIA VILLE ET TRANSPORT - JEAN MIFSUD, BOUYGUES TPRF

Ante las graves patologías que sufre el Gran Puente de Thouaré-sur-Loire, el departamento francés de Loire-Atlantique ha ideado un innovador proyecto de losa fina en hormigón fibrado de ultra alta resistencia de 2.400 m², la más grande de Europa, para sustituir las bóvedas de ladrillos, pintar la totalidad de la estructura metálica, que data de 1882, y aligerar en un 50% el tablero, lo que permitirá incorporar voladizos para la circulación en bicicleta. La integración de una nueva pieza de puente conectada en sección mixta transversal y el recurso intensivo a la prefabricación han contribuido a acelerar el proceso constructivo, validado por un período de trabajo de 6 meses sin incidentes. Esta realización abre nuevas perspectivas para las antiguas estructuras metálicas de obras de fábrica y edificios que responden a las actuales problemáticas medioambientales. □



1

© DRONE PRESS POUR GROUPE SANEF

TROISIÈME TABLIER DU VIADUC DE GUERVILLE

AUTEURS : PIERRE-ANDRÉ SMETRYNS, CHEF DE PROJET, VBSC - GRÉGORIE VILLAIN, RESPONSABLE TRAVAUX, BOUYGUES TPRF - ALEXANDRA LESAGE, CHEF DE PROJET, ARCADIS

LA CONSTRUCTION DU 3^e TABLIER DU VIADUC DE GUERVILLE SUR L'A13, DANS LES YVELINES, S'INSCRIT DANS LE CADRE DU PLAN DE RELANCE AUTOROUTIER. LE MAÎTRE D'OUVRAGE, SAPN, A CONFIE LA MAÎTRISE D'ŒUVRE AU GROUPEMENT ARCADIS/AGENCE L'ANTON ET ASSOCIÉS/STRATES. LE TABLIER DE L'OUVRAGE EST COMPOSÉ DE DEUX POUTRES MÉTALLIQUES ET D'UN PLATELAGE HYBRIDE DALLE MIXTE/HOURDIS BÉTON. LES TRAVAUX SONT RÉALISÉS PAR LE GROUPEMENT BOUYGUES TP RF/BOUYGUES TP/VICTOR BUYCK/COLAS.

CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'OPÉRATION

Le viaduc de Guerville est situé sur l'autoroute A13, entre Paris et la Normandie, entre la sortie n°11 de Mantes-Est et la sortie n°10 d'Épône. Il est composé actuellement de deux tabliers de type VIPP, construits dans les années 60, et qui nécessitent aujourd'hui d'importants travaux d'entretien.

Le trafic quotidien au droit de l'ouvrage est de 120 000 véhicules/jour. Il n'est donc pas possible de réduire le nombre de voies. Un report de la circulation sur le réseau secondaire n'est pas non plus envisageable.

L'ouvrage actuel est composé de deux tabliers distincts, portant chacun un

sens de circulation, à trois voies par sens, sans bandes d'arrêt d'urgence, ce qui limite les possibilités d'exploitation et la sécurité des équipes d'intervention. Il n'est notamment pas possible de réaliser un basculement de la circulation sur un seul tablier pour réparer le deuxième.

En amont, les études de faisabilité ont permis d'étudier deux familles de solutions :

→ Élargissement de l'existant pour pouvoir réaliser le basculement ;

→ Construction d'un nouvel ouvrage.

La conclusion de ces études a conduit le maître d'ouvrage à retenir la construction d'un nouvel ouvrage, pour permettre ensuite les réparations et la reconfiguration de l'existant. Cette

**1- Vue aérienne
de la situation
actuelle.**

**1- Aerial view
of the current
situation.**

solution présente l'avantage d'avoir un impact réduit sur l'exploitation autoroutière. Un tracé au sud du viaduc existant a été approuvé par décision ministérielle en date du 25 mars 2013.

Le montant de l'investissement réalisé par Sapn pour cette opération est de 47 M€ HT. La mise en service du nouvel ouvrage est prévue pour février 2020.

LES ENJEUX DE CONCEPTION

L'ouvrage doit franchir une brèche de plus de 200 m, constituée de la RD113 et de la ligne ferroviaire Paris/Le Havre (figure 2).

La faible emprise disponible entre ces deux infrastructures complique l'implantation d'un appui intermédiaire. Le biais entre le tracé de l'A13 et de la ligne ferroviaire est très important, de l'ordre de 20 grades.

Le site présente également de nombreuses contraintes qui limitent l'espace disponible pour insérer la structure du nouvel ouvrage et les solutions techniques pour sa mise en place : présence d'équipements ferroviaires (traction électrique et portique



2

© DRONE PRESS POUR GROUPE SANEF

de signalisation), nombreux réseaux qu'ils soient enterrés (transport de gaz (GRT-GAZ) le long de la pile P2, AEP diamètre 500 mm le long de la pile P1) ou aériens (lignes Très Haute Tension de 380 kW de la Centrale de Porcheville).

CONCEPTION DE L'OUVRAGE

Le pont est un ouvrage d'art type bipoutre à cinq travées de longueur 52,0 m - 93,5 m - 116,5 m - 63,0 m - 35,0 m (figure 3). La répartition des appuis est imposée par les nombreuses contraintes du site :

2- Vue aérienne du site.

3- Coupe longitudinale.

4- Principe d'appui au droit des piles P2 et P3.

2- Aerial view of the site.

3- Longitudinal section.

4- Support technique for piers P2 and P3.

- L'implantation de la pile P1 est conditionnée par la conduite d'eau le long de la RD113 ;
- La pile P2 est implantée entre la RD113 et les voies ferrées ;
- La pile P3 est positionnée de façon à limiter la longueur de la travée centrale ;
- Les autres appuis (C0, P4 et C5) sont implantés de façon à optimiser le balancement des travées.

L'ouvrage, calculé aux Eurocodes, a été dimensionné pour supporter un trafic routier de classe 1.

LES APPUIS

LA CONCEPTION DES APPUIS

L'ouvrage comporte 5 travées qui reposent sur 6 appuis (figure 3).

L'autoroute A13 franchit la RD113 et les voies ferrées avec un biais très important, de l'ordre de 20 grades.

Une implantation des appuis selon ce biais entraînerait une complexification de la charpente et de son montage, ainsi que des efforts de torsion dans le tablier qui conduiraient à un entretoisement important dans la zone d'appui.

Les concepteurs de l'ouvrage ont donc cherché à réduire le biais des appuis. La solution retenue est la suivante :

- Conserver les culées C0 et C5 droites ;
- Redresser le biais des piles P2 et P3 à environ 70 grades, pour revenir dans un biais modéré ;
- Biaiser les piles P1 et P4 à environ 80 grades pour rattraper progressivement l'écart de biais entre les piles centrales et les culées.

La longueur de la portée principale est optimisée en tangentant les gabarits ferroviaires.

L'emprise des appuis P2 et P3 est réduite en « compactant » les piles : ces deux appuis ne comportent pas de chevêtre, le sommier d'appui est intégré dans le fût. La structure métallique du tablier s'appuie sur ces piles par l'intermédiaire des pièces de pont, les appareils d'appui n'étant de ce fait pas situés sous les poutres principales (figure 4).

LA CONSTRUCTION DES APPUIS

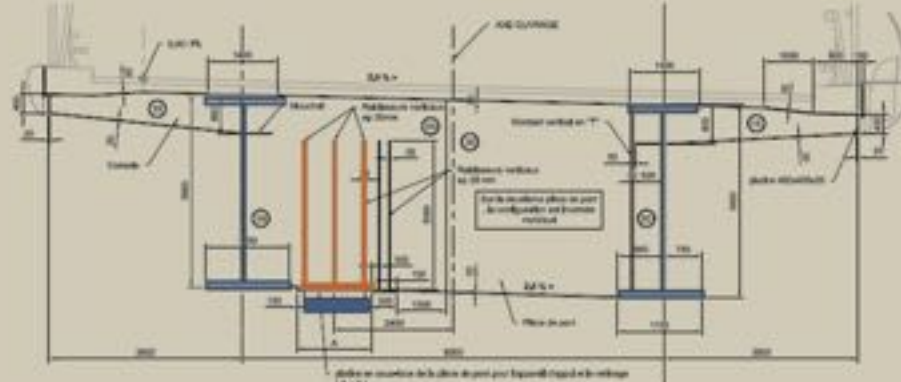
La réalisation des appuis a débuté par la culée C0, seul appui fondé sur semelle superficielle.

COUPE LONGITUDINALE



3

PRINCIPE D'APPUI AU DROIT DES PILES P2 ET P3



4

© BOUYGUES TPRF

© ARCADIS

Après terrassement du terrain naturel pour arriver au fond de fouille prévu, des essais de portance de sol ont été réalisés afin de vérifier que le substratum avait bien les caractéristiques mécaniques retenues dans la note de calcul.

La culée est réalisée en deux phases. Les murs en retour et le garde-grève ne peuvent, en effet, être construits immédiatement car c'est depuis cet appui que la charpente métallique du tablier est assemblée et lancée.

Les élévations ont été coffrées avec des banches à peau bois sur lesquelles une matrice de coffrage a été collée afin d'obtenir un rendu de parement imitation roche.

Une fois cette partie de culée réalisée, les équipes du chantier ont réalisé les piles du viaduc dans l'ordre suivant : P1 - P4 - P2 - P3.

Le choix de cet ordonnancement a été conditionné par le fait que les piles P1 et P4 sont les deux piles non concernées par les contraintes imposées par la SNCF. En effet, la pile P1 se trouve aux abords de la Route Départementale n°113 et la pile P4 dans une zone en friche située entre la plateforme ferroviaire et l'autoroute A13.

Pour construire ces deux appuis, des fondations profondes ont d'abord été exécutées. Chaque pile est fondée sur 6 pieux Ø 1 200 mm et dont la profondeur est respectivement 20,50 m pour la pile P1 et 24,00 m pour la pile P4. Les pieux de la pile P1 ont été réalisés en foré tubé provisoire (figure 5). Cette méthode a pu être retenue car les pieux traversent des couches de craie permettant la mise en place et le retrait d'un tubage provisoire sans difficultés particulières.

Sur P4, il a été nécessaire de modifier la technique employée sur la pile P1 car certaines couches de craie rencontrées lors du forage montraient des signes d'instabilité ne permettant pas de descendre le tubage. Pour se prémunir de cette difficulté, l'utilisation d'une boue bentonitique ayant des propriétés thixotropiques a permis de réaliser les pieux avec un soutien provisoire des parois tout au long de l'exécution.

Après réalisation des pieux, des auscultations par transparence sonore et des carottages ont été réalisés pour vérifier la bonne exécution des fondations profondes. Après validation de ces essais, les pieux ont été recépés et les semelles construites.

L'entreprise responsable du génie civil a proposé de réaliser les fûts de pile à l'aide de coques préfabriquées non



5 © ARCADIS

5- Réalisation des pieux de la pile P1.

6- Schéma de principe des coques préfabriquées.

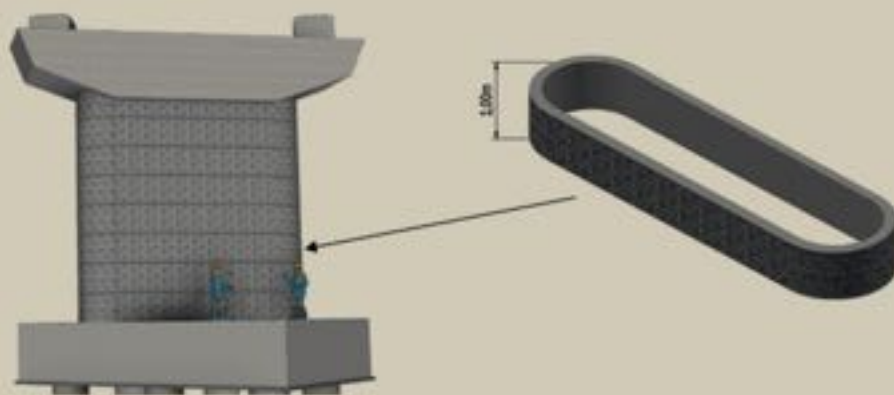
7- Mise en place des coques préfabriquées de la pile P1.

5- Execution of the piles of pier P1.

6- Schematic diagram of prefabricated shells.

7- Placing the prefabricated shells of pier P1 in position.

SCHÉMA DE PRINCIPE DES COQUES PRÉFABRIQUÉES



6 © BOUYGUES TPRF



7 © BOUYGUES TPRF



8- Réalisation du chevêtre de la pile P1.
9- Écran de protection des voies ferrées.
10- Soutènement provisoire.

8- Execution of the cap of pier P1.
9- Railway-track protective shield.
10- Temporary retaining structure.



participatives servant uniquement de coffrage perdu (figures 6 et 7). Ces coques ont été réalisées en usine avec des coffrages bois habillés de matrices imitation roche identiques à celles utilisées sur la culée C0.

Cette solution a été retenue car la construction du fût de la pile P2 aurait nécessité l'emploi de coffrages de grande hauteur. Cette pile étant située à proximité des voies ferrées, l'emprise disponible était limitée et les durées de travail effectif sous coupure de circulation ferroviaire et consignation caténaire étaient courtes (4h).

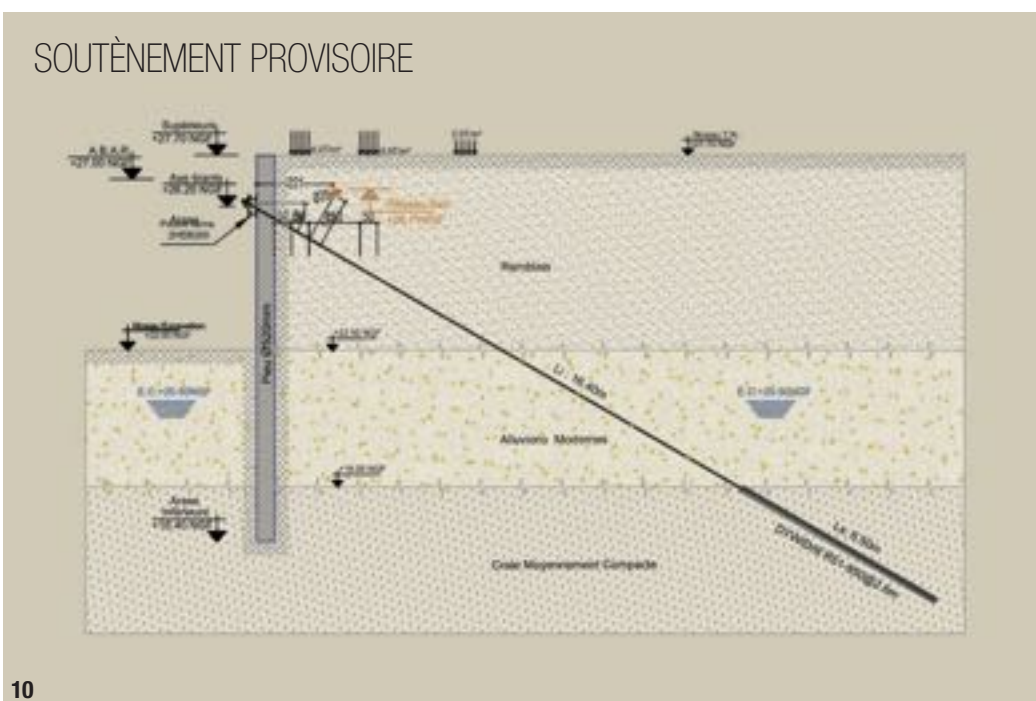
Les coques préfabriquées ont offert l'avantage de ne nécessiter qu'un encombrement réduit et un temps de mise en place très court (pose d'une coque par heure). Cette solution a permis également une sécurisation du planning, la fabrication de ces coques ayant pu se faire en temps masqué, à savoir pendant la réalisation des fondations profondes. Cette solution a été acceptée sous réserve de réaliser l'ensemble des piles selon le même procédé.

Après réalisation des fûts, les chevêtres ont été fabriqués au moyen de tours d'étais et de platelages pour pouvoir poser les coffrages (figure 8). La matrice des chevêtres est différente de celle des fûts (imitation d'un béton bouchardé).

La construction de la pile P2 a démarré à la suite. Cette pile est considérée comme la plus compliquée à réaliser car elle est enclavée entre la route départementale et la voie ferrée où la fréquence des véhicules et des trains est soutenue.

Au préalable, un écran de protection a été réalisé le long des voies ferrées pour veiller à ce que le chantier n'engendre pas d'incidents sur la plateforme ferroviaire (figure 9).

L'écran plein était constitué de profilés métalliques HEA240 de 2 m de hauteur, espacés de 3 m, entre lesquels des madriers ont été insérés.



10

Cet écran avait pour but d'isoler le chantier de la plateforme ferroviaire et a été dimensionné en tenant compte des efforts de vent, des efforts aérodynamiques du passage du train et d'un choc accidentel d'un engin de chantier. Il était fondé sur des pieux métalliques également en HEA240 battus dans le sol. Il était surélevé au droit des poteaux supportant les caténaires pour isoler le chantier des structures ferroviaires aériennes.

Pour renforcer la sécurisation du réseau ferroviaire, un dispositif de surveillance automatisé des voies a également été installé pour détecter d'éventuels désordres planimétriques et altimétriques essentiellement lors des travaux de fondations profondes, dont la nature est susceptible de déstabiliser les avoisinants.

Des prismes d'auscultation ont été installés sur les rails tous les 3 m, sur un linéaire total de 30 m. Ces cibles sont ensuite visées 24h/24 et 7j/7 par 2 tachéomètres robotisés permettant une fréquence de mesure toutes les 20 minutes. Un ordinateur couplé aux 2 tachéomètres calcule les différents écarts de géométrie (dévers, gauche, dressage et nivellement) et envoie des alertes par SMS et mails dès lors que les valeurs dépassent des seuils fixés au préalable par la SNCF.

Un soutènement provisoire a ensuite été réalisé le long de la route départementale. Il est composé de 69 pieux jointifs de diamètre 520 mm et de profondeur 10,60 m, formant une paroi



11
© ARCADIS

continue. La présence d'un réseau de gaz à proximité a imposé de limiter les déplacements en tête de la paroi lors de son excavation.

15 tirants d'ancrage actifs de type Dywidill R51 de longueur 23 m ont été réalisés et mis en tension avec une précontrainte unitaire de 23 t (figure 10). La paroi a ensuite été excavée sur 5,70 m de hauteur pour pouvoir créer la plateforme de travail de l'atelier de fondations profondes.

La pile P2 est fondée sur 6 pieux Ø 1 200 mm et de longueur 22,50 m. Étant donnée la différence altimétrique entre la route et la plateforme, la foreuse a été descendue dans le fond de fouille par une grue automotrice de capacité 160 t calée derrière la paroi de soutènement. Cette opération a été réalisée de nuit sous coupure de circulation ferroviaire et circulation routière alternée (figure 11).

11- Grutage de la foreuse sur la plateforme de travail au droit de P2.

12- Réalisation des pieux de P2.

11- Hoisting the driller onto the work platform at the level of P2.

12- Execution of P2 piles.

Les pieux ont ensuite été exécutés en foré tubé définitif dans les couches alluvionnaires et en foré à la boue bentonitique dans les couches de craie (figure 12). Les tubages définitifs sont issus des exigences de la SNCF au travers de l'IN0033.

Après réalisation des fondations, la foreuse a été de nouveau grutée pour permettre son repli. La gestion des déblais de forage a constitué l'enjeu principal dans l'exécution de ces fondations car l'emprise disponible ne permettait pas de stocker les déblais. Il a donc fallu prévoir une grue et une benne autovidée en permanence pour pouvoir charger des camions et évacuer les déblais à l'avancement.

La semelle a ensuite été construite, puis le fût, à l'aide de coques préfabriquées dont la mise en place a été similaire à celle de P1 et P4.

Pour la pile P3, la méthodologie de réalisation est analogue à celle de P2. Seule différence, un blindage provisoire le long des voies a dû être réalisé car le niveau de la semelle se situe à -4 m par rapport au niveau des voies ferrées. Ce soutènement provisoire a été réalisé en paroi berlinoise. L'ouvrage est constitué de 11 profilés HEB240 de longueur 8 m, espacés de 1,5 m, entre lesquels des rangs de bastaings ont été insérés. Étant à proximité des voies, les profilés ont été battus et les bastaings ont été mis en place à l'avancement du terrassement. La mise en place de ce blindage ne devait en aucun cas déstabiliser la plateforme ferroviaire, ni l'écran de protection permettant l'isolement du chantier.

Les fondations profondes de la culée C5 ont ensuite été réalisées. Cette culée est fondée sur 8 pieux Ø 1 200 mm de longueur 35,30 m. Pour cet appui, les pieux ont été dimen-



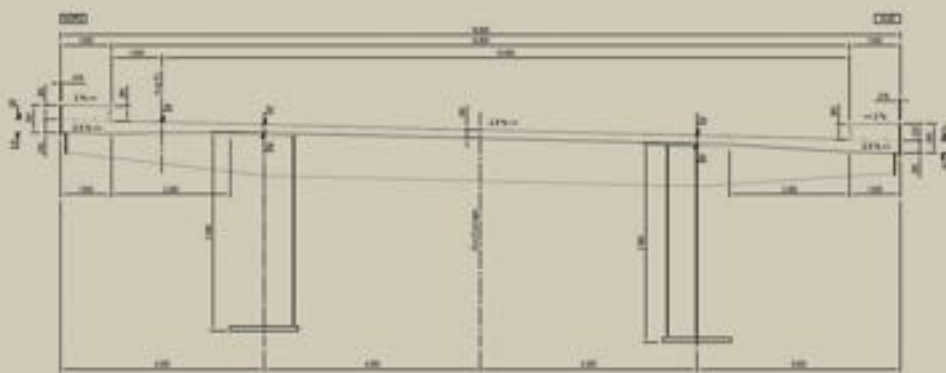
12
© ARCADIS

COUPE FONCTIONNELLE EN PHASE PROJET



13

COUPE TRANSVERSALE EN ZONE DE DALLE MIXTE



14

sionnés et exécutés en foré tubé définitif dans les couches dites compressibles afin de limiter les efforts parasites de frottement négatif. La gaine métallique mise en place autour du pieu permet de diminuer le coefficient de frottement, limitant par là-même le surcroît de compression dans le pieu (le coefficient de frottement métal/sol est en effet plus faible que le coefficient béton/sol).

L'article de la Revue *Travaux*^[1] a largement décrit les travaux de renforcement de sol par inclusions rigides

13- Coupe fonctionnelle en phase projet.

14- Coupe transversale en zone de dalle mixte.

13- Functional cross section in final design phase.

14- Cross section in composite slab area.

sous le remblai d'accès à la culée C5. Pour le génie civil de la culée C5, les modes opératoires appliqués sur la culée C0 ont été reconduits, le mur garde-grève ne pouvant être construit afin de laisser passer l'avant-bec nécessaire au lançage de la charpente métallique.

LE TABLIER

LA COUPE FONCTIONNELLE

Le tablier a une largeur totale de 16,50 m hors corniches. Il est équipé d'une corniche simple côté Nord et

d'une corniche caniveau côté Sud, fixées sur des longrines de largeur 1,00 m. En phase conception, les dispositifs de retenue envisagés étaient des barrières de niveau H3 minimum et des écrans anti-déversement implantés à l'arrière de ces barrières (figure 13). En phase travaux, le groupement a proposé la mise en place d'un dispositif unique jumelant la barrière et l'écran anti-déversement.

La chaussée est composée d'une bande dérasée de gauche (BDG) de 1,00 m, de trois voies de circulation de 3,50 m, et d'une bande d'arrêt d'urgence (BAU) de largeur courante 3,00 m. La largeur de la BAU est variable en sortie d'ouvrage pour rattraper les variations de l'axe en plan. La chaussée est à dévers unique à pente constante de 2,50 % du nord vers le sud (figure 13).

LA STRUCTURE DU TABLIER

Le tablier est un bi-poutre métallique à platelage hybride : en partie centrale, sur une longueur de 156,9 m, le platelage est une dalle mixte composée d'une tôle métallique de 15 mm d'épaisseur connectée à une dalle béton de 16 cm (figure 14 et tableau A). La dalle béton est épaissie au niveau des rives de l'ouvrage pour permettre l'ancrage des dispositifs de retenue. La dalle mixte présente plusieurs avantages : un gain de poids de l'ordre de 100 kg/m², l'évitement de certains inconvénients à la dalle orthotrope (moins de risque de fatigue, meilleure durabilité du support d'étanchéité), et le bétonnage en sécurité au-dessus des voies ferrées sans coupure de circulation des trains. Ce type de platelage présente toutefois un coût plus élevé en travaux, et complexifie les études. La dalle mixte est remplacée par une dalle béton armé classique de 25 cm d'épaisseur sur les zones d'extrémité de l'ouvrage.

La charpente comprend des tôles de nuance S355 et S460.

LA FABRICATION, LE TRANSPORT ET LE MONTAGE

La fabrication de la charpente métallique trouve son origine dans les ateliers de Victor Buyck Steel Construction en Belgique. En premier lieu, des tôles en acier, de nuance et d'épaisseur variables, y sont préparées et découpées sur mesure. Ensuite, avec ces tôles découpées, les éléments constitutifs de la charpente sont assemblés et soudés suivant les précisions exactes des plans de fabrication (figure 15). ▷

TABLEAU A : STRUCTURE DU TABLIER

	Poutres métalliques et dalle béton armé (zones d'extrémité)	Poutres métalliques et dalle mixte (zone centrale)
Longueur (total de 362 m)	121,5 m - 83,6 m	156,9 m
Hauteur de poutre (en mm)	3760	3900
Membrure supérieure (en mm ²)	1 400 x 80 max	1 400 x 100 max
Épaisseur de l'âme (max)	30 mm	35 mm
Membrure inférieure (en mm ²)	1 500 x 100 max	1 500 (1 700 localement) x 120 max
Distance entre pièces de pont (en mm)	4200	2479 maximum



© PHOTOTHÈQUE VICTOR BUYCK STEEL CONSTRUCTION

15



16

© DRONE PRESS POUR GROUPE SANEF



© PHOTOTHÈQUE VICTOR BUYCK STEEL CONSTRUCTION

17



18

© PHOTOTHÈQUE VICTOR BUYCK STEEL CONSTRUCTION

Toute partie de la charpente fait l'objet d'un contrôle rigoureux, tant sur le plan de contrôle non-destructif des soudures que sur celui des tolérances géométriques. Durant la dernière étape de la fabrication, les éléments de charpente sont revêtus d'une protection anticorrosion en plusieurs couches. Une fois ce procédé de préfabrication achevé, les pièces métalliques sont chargées sur des camions semi-remorques pour faire leur chemin vers le chantier de Guerville. En fonction de la taille des colis, il s'agit de convois exceptionnels ou réguliers. Les plus grands convois exceptionnels, transportant les poutres principales de la charpente (de 4 m de large et de 20 à 32 m de long), sont acheminés sur chantier par l'autoroute A13, et cela de nuit, avec neutralisation des voies lente et médiane (figure 16).

Après livraison sur chantier, les différents éléments qui constitueront la charpente de l'ouvrage sont déchargés par grue mobile sur la plateforme de montage et posés sur des appuis provisoires (figure 17).

Les pièces sont assemblées et stabilisées entre elles avec des clames de fixation. Avant d'entamer les travaux

15- Réalisation des pièces de pont en atelier.

16- Livraison de nuit d'un élément de charpente métallique.

17- Déchargement d'un élément de charpente métallique.

18- Montage de la charpente sur l'aire d'assemblage.

19- Avant-bec de lancement.

20- Appuis provisoires de lancement sur la pile P2.

15- Execution of transverse girders in workshop.

16- Night delivery of a steel structure member.

17- Unloading a steel structure member.

18- Structure assembly on the assembly area.

19- Launching nose.

20- Temporary launching supports on pier P2.



19

© PHOTOTHÈQUE VICTOR BUYCK STEEL CONSTRUCTION



20

© DRONE PRESS POUR GROUPE SANEF



21

© DRONE PRESS POUR GROUPE SANEF

de soudage, un réglage géométrique permet d'obtenir la géométrie souhaitée de la charpente. Par la suite, les travaux de soudage ont lieu sous des abris roulants, assurant un environnement de travail commode par toutes conditions météorologiques (figure 18). À l'issue du soudage et du contrôle non-destructif y afférent, la surface de la charpente est nettoyée et les couches finales du système anticorrosion sont apposées sur l'ensemble.

Pour permettre le lançage de la charpente, plusieurs ouvrages provisoires sont mis en place. Il s'agit notamment de l'avant-bec (figure 19) et de l'arrière-bec, fixés aux extrémités des poutres principales, limitant les contraintes dans la charpente et permettant un accostage graduel lors du lançage. Des palées provisoires métalliques sont montées au droit des piles P2 et P3, pour y placer des appuis provisoires de lançage (figure 20).

Le montage de l'ossature métallique sur chantier tel que décrit ci-dessus a lieu en trois phases distinctes, mar-

21- Accostage sur la pile P2.

21- Landing on pier P2.

quées également par trois lançages successifs. Pendant la première phase de montage, les six premiers tronçons de l'ouvrage ont été assemblés.

Le lançage de cet ensemble a été réalisé fin octobre 2017 depuis la culée C0, jusqu'à la deuxième pile P2, sur une distance totale de 109 m (figure 21). La deuxième phase de montage, actuellement en cours, adjoint les six tronçons suivants à l'ouvrage et s'achèvera par un lançage depuis la pile P2 jusqu'à la pile P3. Ce deuxième lançage sera exécuté sur une distance de 153 m, au-dessus des voies ferrées, sous interruption de trafic ferroviaire et coupure des caténaires, pendant le week-end de Pâques 2018. Durant la troisième phase les quatre derniers tronçons seront montés et l'ouvrage

ainsi complété sera lancé début juillet 2018, sur une distance de 98 m, pour aboutir à la culée C5. Après ce dernier lançage, la phase finale sera initiée pour les travaux de charpente métallique, comprenant la mise sur appuis définitifs et la dépose des ouvrages provisoires.

Des travaux de création de voies sont également prévus après le troisième lançage, ainsi que le reprofilage général des chaussées sens 1 et sens 2. □

RÉFÉRENCES :

[1]- G. Villain, P. Jacquot, A. Fieschi, B. Pothier, Troisième tablier au Viaduc de Guerville : renforcements de sol et soutènements, *Travaux*, n°933, juin 2017.

PRINCIPALES QUANTITÉS

TERRASSEMENTS :
220 000 m³

REMBLAIS :
80 000 m³

PIEUX :
1 000 m³

BÉTON :
5 000 m³

CHARPENTE MÉTALLIQUE :
2 600 t

ÉTANCHÉITÉ :
5 300 m²

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Sapn - Direction de la construction (Sanef)

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Arcadis - Strates Architecture - Agence L'Anton & Associés

ENTREPRISES : Bouygues Région France - Bouygues Travaux Publics - Vbsc - Colas

ABSTRACT

THIRD DECK OF THE GUERVILLE VIADUCT

PIERRE-ANDRÉ SMETRYNS, VBSC - GREGORY VILLAIN, BOUYGUES TPRF - ALEXANDRA LESAGE, ARCADIS

The Guerville viaduct is located on the A13 motorway. It consists of two decks with independent prestressed girder spans, built in the 1960s, which now require major maintenance work. The client organisation, Sapn, chose to build a new structure, followed by repair and reconfiguration of the existing one. Project management was awarded to the consortium formed by Arcadis, Strates Architecture and Agence l'Anton & Associés. The deck of the new structure consists of two steel girders and "hybrid" decking with a composite slab/concrete top slab. The works are performed by the consortium formed by Bouygues Tprf, Bouygues Tp, Vbsc and Colas. □

TERCER TABLERO DEL VIADUCTO DE GUERVILLE

PIERRE-ANDRÉ SMETRYNS, VBSC - GREGORY VILLAIN, BOUYGUES TPRF - ALEXANDRA LESAGE, ARCADIS

El viaducto de Guerville discurre sobre la autopista A13. Está formado por dos tableros de tipo VIPP (viaducto de luces independientes con vigas pretensadas), construidos en los años 60, que actualmente precisan importantes obras de conservación. El contratista (Sapn) ha optado por construir una obra nueva, y seguidamente reparar y reconfigurar la existente. La dirección de obra correrá a cargo del consorcio Arcadis - Strates Architecture - Agence la Anton & Associés. El tablero de la nueva construcción está formado por dos vigas metálicas y un enrejado "híbrido" de losa mixta/forjado de hormigón. El consorcio Bouygues Tprf - Bouygues Tp - Vbsc - Colas llevará a cabo las obras. □



1

© RAZEL-BEC

LA POSE DES TABLIERS DU VIADUC DE RENNES

AUTEURS : FLORENT IMBERTY, DIRECTEUR INGÉNIERIE & INNOVATION, RAZEL-BEC - MAXIME DECUREY,
CONDUCTEUR DE TRAVAUX, EIFFAGE GENIE CIVIL - MAXIME STUERGA, INGÉNIEUR MÉTHODES, RAZEL-BEC

LA CONSTRUCTION DU VIADUC DE RENNES SUR LA NOUVELLE LIGNE B DU MÉTRO DE L'AGGLOMÉRATION RENNAISE FAIT APPEL À UNE TECHNIQUE DE CONSTRUCTION PEU UTILISÉE EN FRANCE : LA POSE PAR TRAVÉES ENTIÈRES À LA POUTRE DE LANCEMENT. TOUT AU LONG DE L'ANNÉE 2017, LES RIVERAINS DE CET OUVRAGE REMARQUABLE ONT VU LA POUTRE PROGRESSER DANS LE MILIEU URBAIN ET OBSERVÉ LA POSE DES TABLIERS DU VIADUC. APRÈS LA PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE FAITE DANS LE NUMÉRO 932 DE LA REVUE *TRAVAUX*, CET ARTICLE DÉCRIT LES MÉTHODES DE POSE DU TABLIER.

CONCEPTION GÉNÉRALE DU TABLIER

Situé à l'extrémité Nord-Est de la nouvelle Ligne b du métro, le viaduc de Rennes est un ouvrage urbain d'une longueur de 2395 m, constitué d'une succession de 36 tabliers indépendants : 34 tabliers bi-travées symétriques et 2 tabliers mono-travées. Les longueurs des travées sont variables tout le long du tracé, de 30 à 37 m entre axes des appareils d'appuis. La section transversale (figure 2) est

celle d'un caisson en béton de petites dimensions, précontraint par des câbles entièrement intérieurs au béton, filants d'une extrémité à l'autre de chaque tablier.

L'épaisseur du hourdis supérieur est de 20 cm, celle des âmes est égale à 30 ou 50 cm selon les voussoirs. Les âmes sont munies de clés de cisaillement dont la géométrie a été déterminée en fonction du tracé des câbles de précontrainte au droit des joints de voussoirs. La construction des 70 appuis (figure 3)

et la préfabrication des 973 voussoirs constituant le tablier (figure 4) ont été présentées dans le numéro 932 de la Revue *Travaux* (avril-mai 2017).

LE PROCÉDÉ DE CONSTRUCTION

Dès l'appel d'offres, le choix de la méthode de construction s'est porté sur la pose à l'avancement par travées entières, au moyen de la poutre de lancement. Cette méthode de construction présente de nombreux avantages :

- Cadence de pose élevée ;
- Emprise au sol limitée en phase de pose du tablier ;
- Possibilité d'approvisionner les voussoirs par le tablier déjà construit, limitant ainsi l'impact sur la circulation.

Cette technique est classiquement utilisée pour des ouvrages très répétitifs, rectilignes, généralement constitués de travées indépendantes, avec une précontrainte entièrement extérieure au béton. La technique a donc dû être



adaptée pour tenir compte des spécificités de ce viaduc :

- Ouvrages élémentaires constitués de bi-travées à précontrainte filante entièrement intérieure, sans joint de dilatation, ce qui a imposé de concevoir une poutre de lancement capable de suspendre et de poser la totalité des deux travées de chaque ouvrage.
- Caractéristiques géométriques extrêmes : rayon en plan minimum de 125 m, pente longitudinale maximale de 5 %, dévers transversal maximal de 10 %.
- Variabilité des travées tout au long du tracé, variabilité du nombre de voussoirs par travée.
- Présence de 2 mono-travées que la poutre de lancement doit être capable de poser.

1- Vue d'ensemble du chantier.
2- Section transversale.

1- Overall view of the construction site.
2- Cross section.

- Petites dimensions du caisson, avec des problématiques spécifiques d'accès à l'intérieur du caisson lors des opérations de suspension et de brèlage.
- Exiguïté des têtes de piles pour poser les pieds du lanceur (du fait de la petite dimension de l'ouvrage).

PRÉSENTATION DU LANCEUR

Le lanceur a été conçu et fabriqué spécifiquement pour le projet du viaduc de Rennes. D'un poids total d'environ 550 t, il est constitué des éléments suivants :

- Deux poutres treillis principales, de 110 m de longueur, dimensionnées pour supporter le poids de 2 travées de 40 m courbes (soit environ 1 000 t de charge suspendue excentrée). Poids du treillis : environ 250 t.
- Trois pieds supports, d'un poids compris entre 40 t et 60 t chacun, servant à transférer au tablier et aux piles les charges en phase de pose, et permettant la translation du treillis en phase d'avancement (figure 5).
- Un chariot de pose, dimensionné pour lever le voussoir le plus lourd (voussoir sur pile, environ 65 t).

→ Un ensemble de tiges de suspension et de poutres de répartition permettant de suspendre les 2x15 voussoirs d'un viaduc élémentaire. Une attention toute particulière a été portée à la sécurité d'utilisation du lanceur. À la suite d'un travail conjoint entre le groupement d'entreprises, le fabricant du lanceur et l'Inspection du Travail, la conception de l'outil a été adaptée afin d'optimiser l'ergonomie d'utilisation de l'outil et d'intégrer le plus possible des protections collectives (figure 6).

LA CINÉMATIQUE GÉNÉRALE

Le cycle de réalisation d'un tablier élémentaire bi-travée est constitué des opérations présentées ci-après.

TRANSFERT DE CHARGE

Après la fin de la mise en précontrainte d'un ouvrage, le tablier est « décentré » par dévérinage de la poutre de lancement, ce qui permet d'assurer le transfert de charge entre la poutre de lancement et le tablier précontraint. Le tablier et la poutre étant tous les deux en configuration « 3 appuis » hyperstatique, cette opération est faite en réalisant une série de dénivellements successives contrôlées. Un modèle de calcul complet intégrant la poutre de lancement, le tablier précontraint et ses suspentes a été réalisé, afin de vérifier le bon comportement de l'ensemble de la structure dans cette phase de transfert de charge.

SECTION TRANSVERSALE



AVANCEMENT DE LA POUTRE DE LANCEMENT POUR POSE DU VOUSOIR SUR PILE

Après le transfert de charge vers les appuis, les poutres de répartition sont ramenées à l'aire de stockage des voussoirs. La poutre à vide est prête pour démarrer son déplacement sur l'ouvrage suivant. Par une succession de translations et de rotations du treillis principal, de ses trois appuis et du chariot de levage, la poutre est déplacée jusqu'à la pile suivante. Le support avant vient se poser sur une palée provisoire préalablement mise en place à proximité de la pile et les supports milieu et arrière s'appuient sur le tablier précédent (figure 7).

Le voussoir sur pile (VSP) du futur tablier, suspendu au chariot de levage pour assurer la stabilité pendant la première phase du déplacement est posé, réglé et cloué provisoirement à la pile par des câbles précontraints.

AVANCEMENT DE LA POUTRE DE LANCEMENT POUR SUSPENSION DES VOUSOIRS

Lorsque le VSP est posé et réglé (figure 8), l'avancement de la poutre se poursuit jusqu'à la position finale de pose. Le support avant est alors appuyé sur la pile-culée avant, le support milieu sur le VSP, et le support arrière sur l'extrémité du tablier précédent.

SUSPENSION DES VOUSOIRS

En phase de pose, les voussoirs entièrement équipés sont acheminés par le fardier de transport depuis la zone de stockage située à l'extrémité de l'ouvrage jusqu'à l'arrière de la poutre en empruntant le viaduc déjà construit. Le chariot de levage de la poutre de lancement les prend en charge et les emmène un à un dans un ordre préétabli à leur position de suspension sous les deux poutres treillis (figure 9).

Ils sont placés en quinconce afin de permettre la rotation du dernier voussoir de chaque travée, et la charge de chaque barre de suspension est mesurée.

ENCOLLAGE, BRÛLAGE ET MISE EN PRÉCONTRAÎNTE

Lorsque l'opération de mise en suspension est entièrement terminée, la poutre de lancement a pris sa flèche complète et les phases suivantes ne subiront plus de variation notable.

Symétriquement en partant du VSP, chaque voussoir est repris par le chariot de levage pour être collé et brûlé provisoirement au précédent au moyen



3

© FAZEL-BEC

de barres précontraintes. Le brûlage permet de comprimer instantanément la colle et de garder en compression les joints lors des prochaines opérations (suspension des autres voussoirs et passage du chariot notamment).

Après reprise en charge par le chariot, collage et brûlage du voussoir au précédent, les suspentes sont remises en place et les efforts mesurés à l'étape précédente y sont réinjectés. Ceci permet de s'assurer que le poids du voussoir est entièrement pris en charge par la poutre et qu'une partie ne transite pas par les voussoirs précédents.

Lorsque tous les voussoirs ont été collés et brûlés, la précontrainte définitive peut être mise en œuvre : les câbles sont enfilés d'un bout à l'autre du tablier sur une longueur de 70 m environ. La mise en tension est opérée en actif-passif depuis l'extrémité avant de l'ouvrage posé. Cette opération est

3- Ferrailage des piles en Y.

4- Aire de pré-fabrication.

3- Reinforcement of Y-shaped piers.

4- Prefabrication area.

aider à une prise de décision optimale. En effet, lorsque les vitesses limites risquent d'être dépassées, les opérations ne peuvent être démarrées sans s'assurer que la poutre puisse être mise rapidement en position de sécurité. Deux niveaux de mise en sécurité sont prévus pour garantir la stabilité pour des vitesses de vent de 110 km/h et 160 km/h respectivement.

Lors d'une cinématique d'avancement, deux positions de sécurité sont définies, dans lesquelles la poutre est sur deux appuis et centrée sur eux avec des contrepoids supplémentaires (chariot ou support avant suspendu).

Lorsque la poutre est en position de pose, et donc sur trois appuis, la mise en sécurité nécessite la suspension d'un nombre minimum de voussoirs (qui dépend de la longueur des travées), afin de garantir la stabilité de la poutre en cas de tempête.

réalisée à partir de la passerelle intégrée au pied avant de la poutre de lancement.

CONFIGURATIONS DE MISE EN SÉCURITÉ

L'utilisation de la poutre dans toutes les configurations de pose et d'avancement est conditionnée par des vitesses de vent maximum à respecter. Une collaboration étroite avec les services de Météo France a été mise en place pour



4

© FAZEL-BEC



5

© RAZEL-BEC

LE PHASAGE DE MISE SUR APPUI

Plusieurs phases de transfert de charges impliquant des changements de configuration d'appuis sont nécessaires entre le tablier et les piles. Ces appuis ont dû être adaptés à l'exiguïté des têtes de piles. Lorsque le VSP est réglé sur la pile centrale pendant l'avancement, il est posé sur 4 vérins supports indépendants et cloué à la pile par des câbles précontraints croisés. Tous ces équipements, ainsi que le VSP posé, occupent la totalité de la tête de pile. Le support avant de la poutre est posé sur une palée provisoire indépendante fondée sur la semelle de pile. Lors des phases suivantes de l'avancement, la poutre s'appuie sur le VSP. Les 4 vérins indépendants forment un encastrement ne permettant aucune rotation entre le VSP et la pile.

5- Vue d'ensemble de la poutre de lancement.

6- Dispositifs de franchissement des poutres de répartition des voussoirs.

7- Pose du pied avant sur la palée provisoire pour mise en place du VSP.

5- General view of the launching girder.

6- Segment distribution beam crossing systems.

7- Placing the front pillar on the temporary bent for installing segments on piers.

Les efforts horizontaux (transversaux et longitudinaux) sont transmis par frottement béton/acier entre les VSP et les têtes de vérins, et par frottement acier/béton entre la plaque support des vérins et la tête de pile.

Une fois l'avancement terminé, les voussoirs suspendus, la précontrainte mise en place et le décentrement réalisé, les vérins sont couplés hydrauliquement deux à deux dans le sens longitudinal, créant ainsi une liaison rotulée entre le VSP et la pile, indispensable dans les prochaines phases où la poutre s'appuiera à proximité du VSP. Côté piles culées, les voussoirs d'extrémité sont posés sur deux vérins mis en place dans des boîtes en acier libres longitudinalement, pour permettre le rétrécissement du tablier lors de la mise en précontrainte. Dans les phases d'avancement suivantes, les efforts

longitudinaux sur un tablier sont alors transmis uniquement à la pile centrale sur laquelle le VSP est posé.

Le tablier est mis sur ses appuis définitifs en néoprène fretté dès que la poutre de lancement a avancé et est appuyée sur les travées suivantes. Les équipements hydrauliques sont récupérés pour équiper les tabliers suivants. Il est à rappeler que la géométrie du tablier est complètement réglée en phase de préfabrication des voussoirs par la méthode des joints conjugués.

LA POSE DES TRAVÉES TRÈS COURBES

Dans les courbes très prononcées (rayon en plan de 125 m), l'excentrement entre la poutre et ses supports devient trop important pour assurer la stabilité de la poutre selon la procédure habituelle. ▶



6



7

© RAZEL-BEC



8

© FAZEL-BEC

Dans ces cas, il est alors nécessaire de mettre en place une palée latérale provisoire sous les supports de la poutre (figure 10).

Ces palées sont fondées superficiellement et sont munies de vérins hydrauliques en tête permettant de compenser les pertes dues au tassement éventuel de la semelle au fur et à mesure du chargement des voussoirs.

LES OUTILS DE PILOTAGE DE LA POUTRE

L'ouvrage est constitué d'une série de tabliers tous géométriquement différents : longueur des travées, courbure en plan, pente et dévers.

La poutre doit être capable de s'adapter à toutes les configurations de pose et d'avancement.

L'avancement d'un tablier au suivant se décompose en 60 à 120 phases de déplacements élémentaires tels que suspension puis déplacement d'un support de l'arrière au milieu du treillis, avancement ou rotation de la poutre, déplacements du chariot de levage, etc. Chacune de ces phases doit être vérifiée car elle peut avoir des conséquences importantes, tant vis-à-vis de la stabilité générale de la poutre que des efforts transmis aux tabliers précédents et aux piles (figure 11).

Une chaîne de calculs, de dessins et de vérifications a donc été mise en place, impliquant le fabricant de la poutre, les équipes chantier ainsi que les bureaux d'études structures et méthodes.

Pour chaque avancement, un plan détaillé des phases de déplacements

8- Réglage géométrique du voussoir sur pile.

9- Phase de suspension des voussoirs.

10- Palée latérale en zone très courbe.

8- Geometric adjustment of segment on pier.

9- Segment suspension phase.

10- Side bent in very curved area.

élémentaires est réalisé par les équipes chantier en accord avec le fabricant, validant chaque phase vis-à-vis des fonctionnalités de la poutre.

Après validation, les descentes de charge de la poutre et les efforts dans les tabliers et les piles, ainsi que les flèches du treillis, sont calculés grâce à un outil informatique complet développé spécifiquement par le bureau d'étude de l'entreprise.

Ces données permettent la vérification structurelle du tablier et des appuis dans chacune des phases élémentaires.

Si ces vérifications sont correctes dans toutes les phases, l'avancement est validé. Sinon, des modifications sur la cinématique sont réalisées et la chaîne de vérifications recommencée.



9



10

© FAZEL-BEC



11

© RAZEL-BEC

Cette cinématique contrôlée a été retranscrite sur une checklist de pilotage de la poutre sur le chantier. Ce processus rigoureux impliquant tous les acteurs a permis de s'assurer de la maîtrise de chacune des phases, en toute sécurité pour les opérateurs, et a ainsi permis de sécuriser le projet dans son ensemble (figure 1). □

11- Configuration en courbe avec fort excentrement de la poutre.

11- Configuration in a curve with major offcentring of the girder.

PRINCIPALES QUANTITÉS

PIEUX DIAMÈTRE 1000 : 1 200 m
SOUTÈNEMENTS ET BLINDAGES : 5 100 m²
BÉTON : 23 000 m³
ARMATURES PASSIVES : 4 300 t
PRÉCONTRAINTÉ INTÉRIEURE : 618 t
COFFRAGES FINS : 500 m²
BANDEAUX BFUP : 10 000 m²
MURS EN GABIONS : 1 700 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE :
Rennes Métropole ; Maitre d'ouvrage délégué : Semtcar
MAÎTRE D'ŒUVRE DE LA LIGNE B :
Egis Rail, Egis Bâtiments, Arcadis, L'Heude & L'Heude
CONCEPTION ARCHITECTURALE DU VIADUC : Lavigne Cheron
MAÎTRISE D'ŒUVRE DU VIADUC : Egis Jmi
CONSTRUCTION : Razel-Bec (mandataire), Eiffage
BUREAUX D'ÉTUDE D'EXÉCUTION ET MÉTHODES :
Razel-Bec (D2i), Eiffage (Biep)
CONTRÔLE EXTERNE ÉTUDES : Secoa

PRINCIPAUX PRESTATAIRES

COFFRAGES : Coffrage & quipage
BÉTON : Pigeon Béton
ARMATURES : Lambda
PRÉCONTRAINTÉ ET APPAREILS D'APPUI : Etic
LOGICIEL RÉGLAGE GÉOMÉTRIQUE : Formule Informatique
LANCEUR : Deal
BANDEAUX ARCHITECTURAUX : Via Pontis

ABSTRACT

PLACING THE DECKS OF THE RENNES VIADUCT

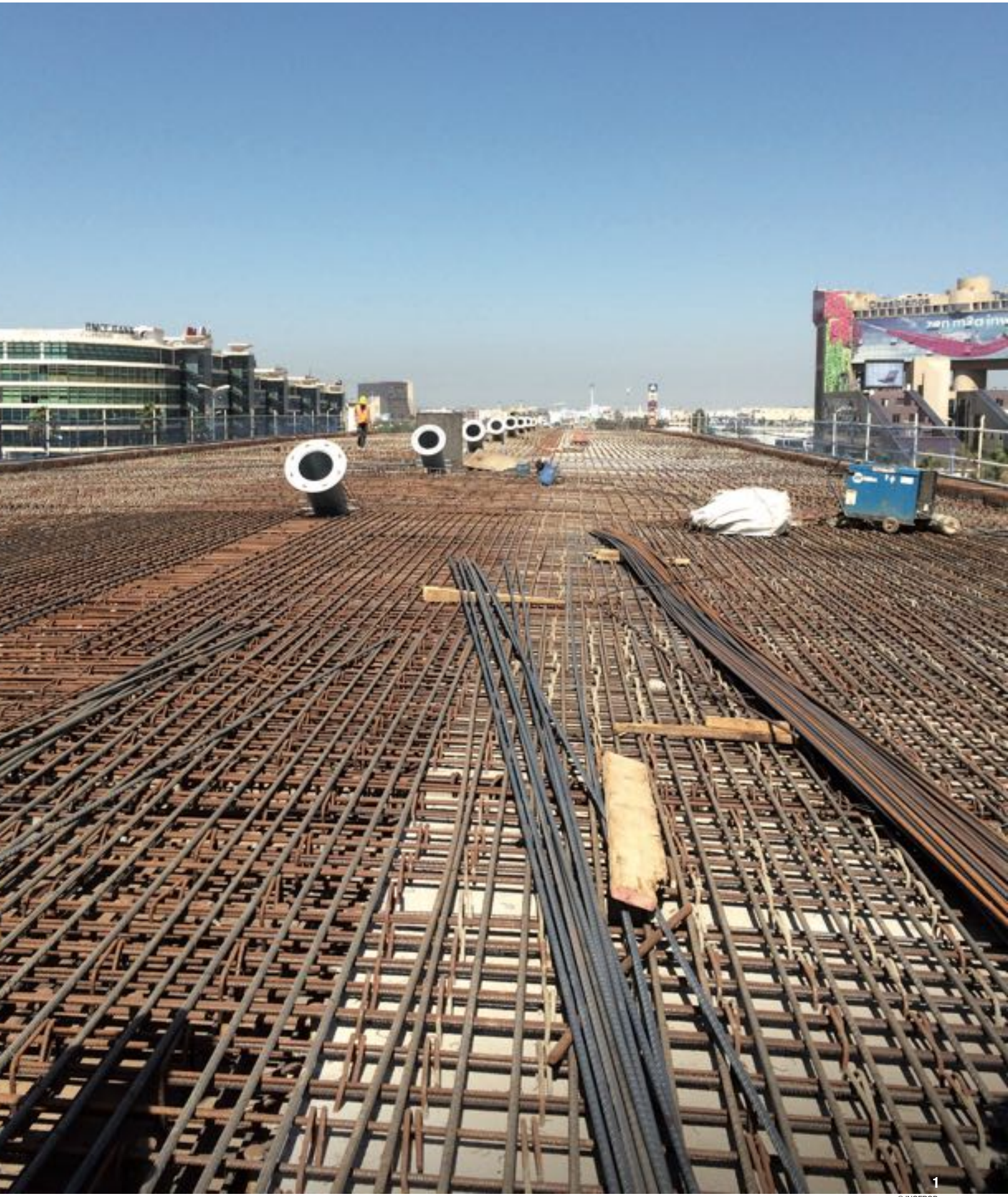
FLORENT IMBERTY, RAZEL-BEC - MAXIME DECUREY, EIFFAGE GENIE CIVIL - MAXIME STUERGA, RAZEL-BEC

The viaduct of Rennes Metropolis metro line b is formed of prefabricated, prestressed ribbed segments placed in position with a launcher. It is 2,395 metres long, formed of separate two-span and single-span decks, and rests on 70 piers spaced 30 to 37 metres apart. The 973 segments were prefabricated on site at one end of the viaduct and carried by the built structure as work progressed. The deck was placed with a 550-tonne launching girder allowing two spans to be placed simultaneously. The technique had to be adapted to allow for the extreme geometric properties of this urban structure. □

LA COLOCACIÓN DE LOS TABLEROS DEL VIADUCTO DE RENNES

FLORENT IMBERTY, RAZEL-BEC - MAXIME DECUREY, EIFFAGE GENIE CIVIL - MAXIME STUERGA, RAZEL-BEC

El viaducto de la Línea b del metro del área metropolitana de Rennes está formado por dovelas nervadas prefabricadas pretensadas, instaladas mediante un lanzador. Con una longitud es de 2.395 m, consta de tableros independientes bi-luz y mono-luz y reposa sobre 70 pilotes situados a una distancia de 30 a 37 m. Las 973 dovelas se han prefabricado in-situ, en un extremo del viaducto, y se han transportado aprovechando la obra previamente construida. El tablero se ha colocado mediante una viga de lanzamiento de 550 t, que ha permitido colocar dos luces simultáneamente. Ha habido que adaptar la técnica para tener en cuenta las características geométricas extremas de esta obra urbana. □



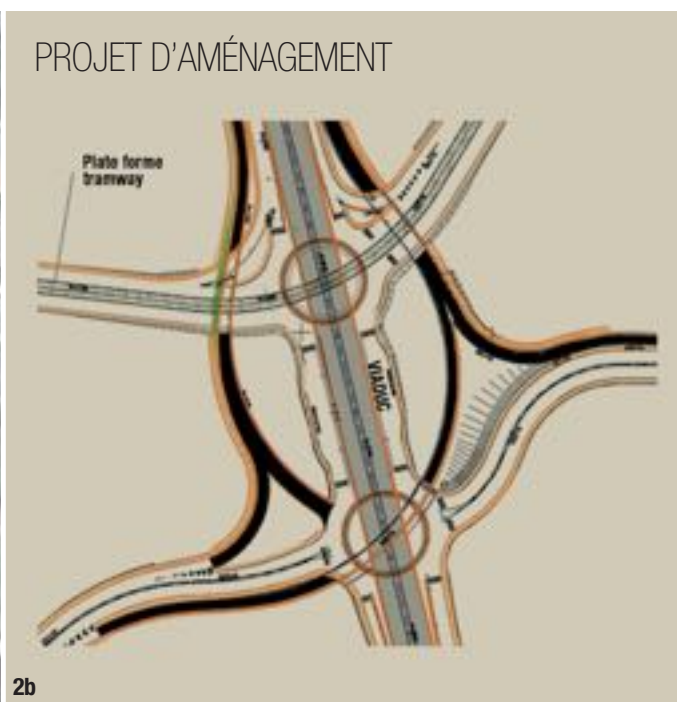
LE PONT DE SIDI MAÂROUF À CASABLANCA

AUTEURS : MARIE-VÉRONIQUE PÉRON, EXPERT TECHNIQUE, INGEROP - M'HAMED LAZOUZI, RESPONSABLE ASSISTANCE MAÎTRISE D'ŒUVRE SUR SITE, NOVEC - MEHDI BELJIDJ, INGÉNIEUR ASSISTANCE MAÎTRISE D'ŒUVRE SUR SITE, NOVEC

L'AMÉNAGEMENT DU CARREFOUR SIDI MAÂROUF EST UN ENJEU IMPORTANT POUR LA VILLE DE CASABLANCA (MAROC). LE NŒUD ACTUEL EN ÉTOILE À 6 BRANCHES EST EN PERMANENCE SATURÉ. LE VIADUC VA PERMETTRE UNE LIAISON DIRECTE DU CENTRE-VILLE À LA ROUTE MENANT À L'AÉROPORT MOHAMMED V. PAR SA STRUCTURE HAUBANÉE ET SON ARCHITECTURE, CE PONT MET EN VALEUR L'ENTRÉE DANS LA VILLE.



2a
© GOOGLE



2b
© DRE

LE CONTEXTE ET LES PROBLÈMES ACTUELS

Casablanca, capitale économique du Maroc, est la plus grande ville du Maghreb par la population (près de 5 millions d'habitants).

Par ses activités portuaires et industrielles, Casablanca constitue un nœud de transport majeur pour le pays et l'Afrique du Nord avec une forte densité de routes et un taux de véhicules/jour très important.

Le carrefour Sidi Maârouf est l'un des principaux carrefours du sud-ouest de la ville, entre les quartiers de Sidi Maârouf et d'Aïn Chok. Il se situe à l'intersection de la RN11, du boulevard

1- Tubes d'ancrage dans la travée principale.

2a- Carrefour avant travaux.

2b- Projet d'aménagement.

1- Anchoring tubes in the main span.

2a- Intersection before works.

2b- Development plan.

des Préfectures, du boulevard de Fès et du Boulevard Sidi Maârouf. C'est notamment le principal accès à la ville de Casablanca pour le trafic en relation avec l'aéroport Mohammed V et la ville de Marrakech par la RN11. Son aménagement entre dans le projet global de développement de la ville.

Le « carrefour Sidi Maârouf », nœud stratégique dans le canevas du réseau routier de Casablanca, présente des dysfonctionnements et est en saturation quasi-permanente du fait de la complexité de l'aménagement actuel (figure 2a). Il se situe à l'intersection de trois axes de quatre à six voies de circulation chacun.

De configuration classique, le carrefour est actuellement régulé par des feux, selon un cycle fixe de trois phases. Les problèmes de cette configuration sont nombreux dont notamment :

- Perte de temps pour les véhicules transitant par la RN11 ;
- Mauvaise intégration de l'intersection dans le tissu urbain (l'emprise revêtue du carrefour est très importante) ;
- Risque de collision au centre du carrefour dû à une régulation conflictuelle ;
- Circulation piétonnière difficile ;
- Progression difficile des transports collectifs.

LE PROJET

LE PROJET D'AMÉNAGEMENT

Les objectifs résident essentiellement en un réaménagement des fonctionnalités existantes en limitant à minima les emprises des nouveaux éléments et en valorisant les nouvelles structures dans le paysage.

Les études menées sur ce carrefour en 2006 dans le cadre du projet d'élargissement de la RN11 et actualisées en 2009 dans le cadre de l'étude du pont à haubans du carrefour Sidi Maârouf ont donné lieu à un aménagement en dénivelé à trois niveaux du carrefour :

- Un niveau +1 qui dans lequel la RN11 enjambe le carrefour par un pont à haubans respectant un gabarit de 6,50 m, et qui permet le flux direct prépondérant Casablanca-Aéroport ;
- Un niveau 0 qui prévoit un double giratoire destinés à assurer la gestion locale des flux directionnels d'échange inter-quartiers ;
- Un niveau -1 qui prévoit deux trémies et qui permet d'assurer le deuxième flux prépondérant Casablanca- Sidi Maârouf dans les deux sens.

Pour des contraintes liées principalement aux difficultés et aux procédures de libération d'emprise, les autorités ont décidé de lancer en premier lieu les travaux de la dénivellation de la RN11 en réalisant le pont à haubans, l'aménagement du niveau 0 et le raccordement aux branches existantes.

Les travaux des trémies répondant aux flux Est-Ouest seront réalisés dans un deuxième temps (figure 2b).

LA CONCEPTION DU PONT À HAUBANS

En 2010, un groupement constitué de Team Maroc - T ingénierie - Greisch - Frédéric Zirk Architecte a élaboré un projet de l'ouvrage de franchissement du carrefour sur la base des objectifs principaux du cahier des charges :

- Disposer d'une structure lisible « porte majestueuse » sur le grand axe Nord-Sud, valorisant la pénétrante venant de l'aéroport et valorisant la ville de Casablanca ;
- Disposer d'une structure légère s'intégrant harmonieusement à la géométrie urbaine, respectant les transparences visuelles, permettant une circulation très fluide sous le pont tant en phase provisoire qu'en phase définitive.

La réponse du groupement architecte-ingénieur consiste en (figures 3a et 3b) :



3a

© ARCHITECTE FRÉDÉRIC ZIRK



3b

© ARCHITECTE FRÉDÉRIC ZIRK

- Un signal de grande ampleur, d'entrée-sortie de ville par la création d'une porte d'entrée visuelle constituée de la double nappe des haubans côté Sud et de la nappe unique côté Nord ;
- Un tablier métal de forme contemporaine ayant une expression de légèreté, de couleur blanche symbolique de Casablanca ;
- Une pile d'appui du pylône incliné dans le giratoire Sud, une pile dans le giratoire Nord ;
- Des culées aux voiles de front arrondis pour répondre à la concavité des giratoires ;
- Des murs de culées avec traitement de modénature et d'aspect très spécifiques.

L'ouvrage d'une longueur totale de 285 m comprend un tablier caisson mixte de 224 m de long et deux culées massives, la culée C3 servant de contrepoids à la travée haubanée.

3a- Élévation architecturale.

3b- Porte d'entrée dans Casablanca.

3a- Architectural elevation view.

3b- Gateway to Casablanca.

Les longueurs de travées sont 36 m - 138 m - 50 m Le pylône incliné à 12°, en béton armé et ossature métallique de 64 m de haut est encastré dans le tablier mixte. Celui-ci, encastré sur C3, glisse sur les autres appuis C0 - P1 et P2 via des appareils d'appuis à pot. Le pylône en caisson béton armé, se découpe dans la zone de haubanage en intégrant des cages métalliques d'ancrage des haubans.

LES MISSIONS NOVEC - INGEROP

Le groupement Novec-Ingerop est intervenu avant le démarrage des travaux par une analyse critique du dossier d'APD et DCE.

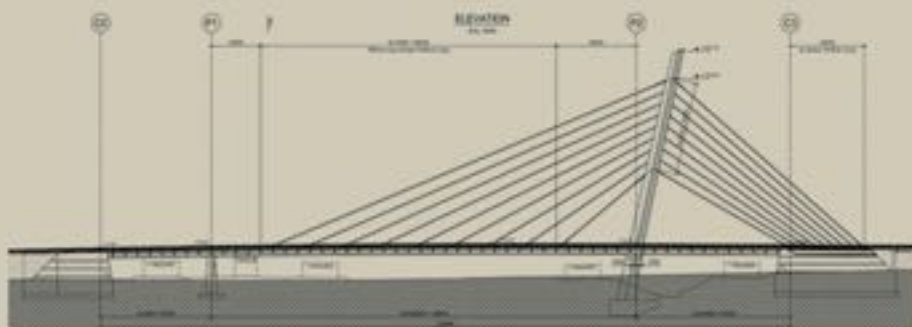
Ensuite, les missions concernent la phase réalisation avec le visa des études d'exécution réalisé par Ingerop, le suivi des travaux via la supervision continue réalisée par Novec et des missions ponctuelles d'expertises effectuées par Ingerop.

LES TRAVAUX

Les travaux ont été confiés à l'entreprise marocaine Seprob qui a sous-traité la charpente métallique à l'entreprise italienne Maeg et la fourniture et mise en œuvre des haubans à l'entreprise Freyssinet.

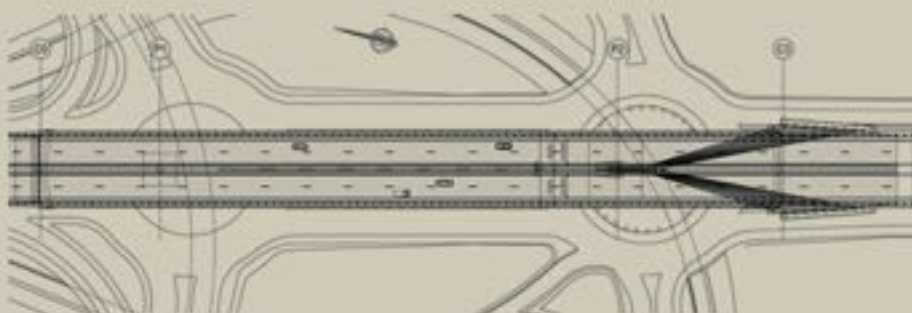
Les bureaux d'études Team Maroc et loa sont en charge des études d'exécution (figures 4a, 4b et 5).

ÉLÉVATION



4a

VUE EN PLAN



4b

© TEAM MAROC

COUPE TRANSVERSALE



5

© TEAM MAROC

LES ÉTUDES AÉRODYNAMIQUES

Compte tenu de la spécificité de la structure, large, souple en torsion et proche du sol, Ingerop a suggéré des investigations sur le comportement aéroélastique du pont à haubans car celui-ci ne paraissait pas aisément prédictible. Des investigations sur les effets dynamiques du vent sur la stabilité, sur le confort, et les effets du vent turbulent ont été préconisées et les essais aérodynamiques ont été confiés au Cstb à Nantes dès le démarrage du marché travaux.

En phase de construction et en phase de service, avec ou sans trafic, l'étude montre l'absence de détachement tourbillonnaire aux plus basses vitesses et pas d'instabilité (torsion ou flexion/torsion) aux plus fortes vitesses. Les coef-

4a- Élévation.
4b- Vue en plan.
5- Coupe transversale.

6a- Pile P2 au droit du pylône - fouille.

6b- Pile P2 - fondation.

4a- Elevation view.

4b- Plan view.

5- Cross section.

6a- Pier P2 at the pylon level - excavation.

6b- Pier P2 - foundation.

ficients de force mesurés ont permis les calculs de comportement dynamique de l'ouvrage sous vent turbulent.

LE PHASAGE DES TRAVAUX

La cinématique de réalisation consiste successivement en :

- La réalisation de l'ensemble des fondations et appuis ;
- La fabrication de la charpente métallique dans les usines de Maeg en Italie ;
- Le transport des tronçons sur site par containers ;
- Le montage et l'assemblage de la charpente ;
- La pose des prédalles du tablier mixte ;
- Le ferrailage et le coulage du béton du tablier ;

→ La connexion du tablier par une précontrainte longitudinale dans la culée C3 ;

→ La réalisation du pylône et la mise en œuvre du haubannage en conservant la ligne inclinée du pylône lors de chaque mise en tension ;

→ La pose des équipements du tablier.

LES FONDATIONS ET APPUIS

Les fondations des appuis sont constituées d'importants massifs en béton armé. Des fouilles profondes ont été réalisées notamment sur P2 (pile supportant le pylône) pour atteindre le niveau de sol souhaité dans la couche de grès. La semelle carrée 16 m x 16 m, de 5 m de hauteur est fondée à 12 m de profondeur est coulée en pleine fouille sans soutènements (figures 6a et 6b). ▷



6a

© INGEROP



6b

© NOVEC

En période estivale, la problématique majeure rencontrée fut le coulage du béton en grande masse de la semelle et la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne provoquée par la chaleur d'hydratation du ciment. Pour rester inférieur à 75°C, des mesures spécifiques comme un ciment à chaleur d'hydratation de 300 KJ/Kg à 41 h, un bétonnage à l'aube, le refroidissement systématique du malaxeur par de l'eau très froide et un arrosage des granulats ont garanti la maîtrise de la température (béton frais 28°C maximum lors du coulage).

La culée C3, culée massive équilibrant la travée haubanée, est une culée creuse de 45 m de long et de 25 m de large disposant d'oreilles latérales pour l'installation des ancrages des haubans arrière. Via des connecteurs sur la charpente et une précontrainte longitudinale entre tablier et culée, le tablier mixte est encastré dans la dalle supérieure de la culée. À cela s'ajoute une précontrainte transversale dans la dalle supérieure pour équilibrer les efforts de flexion liés aux tensions latérales des haubans. Un soin particulier a été porté à la réalisation de ces zones

d'ancrage à géométrie variable et à forte densité d'aciers passifs.

Sur les culées, la concavité des voiles avant et la mise en œuvre de deux matricages (minéral et bois) des parements latéraux extérieurs complètent l'intégration de l'ouvrage dans le site (figure 7).

LE TABLIER MIXTE

Le tablier de 21,50 m de large est constitué d'un caisson central mixte de 5,00 m de large et 2,50 m de haut supportant de chaque côté des consoles de 8,25 m de long et d'une dalle en béton de 25 cm d'épaisseur. La charpente métallique, fabriquée dans les usines Maeg en Italie, est acheminée par bateaux en trois livraisons jusqu'au port de Casablanca puis assemblée sur site. Les tronçons (de 22 m à 44 m de long) de caissons sont posés à la grue sur les palées provisoires, puis les consoles sont soudées au caisson (figure 8).

Dans les zones surplombant les voiries, les poses sont réalisées de nuit. Sur site, une dizaine d'ouvriers et soudeurs ont assuré l'assemblage-montage pendant 6 mois. La charpente posée sur les appuis définitifs et sur les palées

provisoires est positionnée au niveau contrefléché du tablier. La dalle béton est réalisée en 2 phases : la pose des prédalles participantes et le ferrailage-bétonnage de la partie béton coulée en place en alternant les plots pour une

meilleure maîtrise des déformations verticales et de retrait.

Le caisson métallique au droit de l'appui du pylône est rempli de béton pour assurer une bonne transmission de l'effort de compression entre la base de celui-ci et les appareils d'appuis. Des préconisations adaptées lors du coulage ont été prises pour garantir le contact entre la tôle supérieure du caisson et le béton intérieur.

Le tablier étant posé sur ses appareils d'appui définitifs, les rotations du tablier sur les appuis notamment sur P2 (appui du pylône incliné) doivent rester limitées lors de la réalisation du pylône et des mises en tension (figure 9).

7- Mur de culée C0.

8- Montage du caisson central sur palées.

9- Tablier mixte sur P2 et sur palées.

10- Tubes d'ancrage sur les oreilles de C3.

7- Abutment wall C0.

8- Central box section assembly on bents.

9- Composite deck on P2 and on bents.

10- Anchoring tubes on the lugs of C3.

LE PYLÔNE ET LES HAUBANS

Le pont dispose de 27 haubans répartis suivant trois nappes (figures 1 et 10) :

- Une nappe de 9 haubans ancrés sur le terre-plein central de la travée principale de 138 m de portée, et sur la partie avant du pylône (unités variant de 55 torons à 83 torons) ;
- Deux nappes de 9 haubans ancrés sur le pylône et sur les oreilles latérales de la culée C3 (unités variant de 23 à 35 torons).





chaque phase ce qui limite les valeurs de contreflèches horizontales, facilite la construction et le contrôle géométrique.

LES TRAVAUX FUTURS

La réalisation du pylône incliné avec la mise en œuvre d'un impressionnant échafaudage va se poursuivre avec les phases de mise en tension des haubans et de réglage général de la géométrie du tablier et du pylône.

Une vigilance spécifique sera portée sur le contrôle géométrique du tablier (décollement du tablier sur palées), le contrôle de tension des haubans et le contrôle géométrique du pylône.

La pose des équipements, la réalisation des accès en terre armée et le revêtement de chaussée seront la touche finale de la réalisation de cet ouvrage emblématique, porte d'entrée dans Casablanca (figure 12). □

Le pylône en béton de 65 m de haut a une forme en U d'une longueur variant de 4,50 m au niveau du tablier à 3,50 m en tête et d'une largeur inférieure à 2,40 m. Dans la zone accueillant les haubans, le U béton devient 2 voiles reliés par des voussoirs métalliques d'une dizaine de mètres de haut connectés au béton et supportant les ancrages. La résistance au flambement latéral du pylône est assurée par la double nappe arrière des haubans. Le pylône est réalisé au moyen d'un coffrage grim pant et d'un échafaudage adapté à l'inclinaison longitudinale du pylône. En janvier 2018, le pylône est bétonné sur une douzaine de mètres de hauteur au-dessus du tablier qui est entièrement réalisé (hors équipements et revêtement de chaussée), posé sur ses appuis définitifs, sur les palées provisoires et encastré sur la culée C3 (figure 11).

11- Le pylône en construction.
12- Le chantier en janvier 2018.

11- Pylon under construction.
12- Construction site in January 2018.

LES HAUBANS

L'entreprise Freyssinet en charge de la fabrication des haubans et de la mise en place a mené un essai spécifique à la fatigue et à la traction sur l'unité de 91 torons conformément au marché et aux recommandations CIP.

La mise en tension à venir des haubans se faisant par série de 3 haubans (1 avant et 2 arrière), la structure du pylône est à sa position définitive dans

PRINCIPALES QUANTITÉS

CHARPENTE MÉTALLIQUE : 1 600 t
BÉTON (C40/50 C50/60) : 11 000 m³
ARMATURES POUR BÉTON : 1 657 t
HAUBANS : 102 t
TERRASSEMENTS EN DÉBLAI : 18 700 m³
TERRASSEMENTS EN REMBLAI : 30 000 m³
DISPOSITIFS DE SÉCURITÉ (DBA/BN4) : 1 000 m
ENROBÉS DES VOIRIES ET COUCHE DE ROULEMENT DU PONT : 18 500 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Direction Régionale de l'Équipement - Casablanca
MAÎTRE D'ŒUVRE : Direction de l'Aménagement de l'Échangeur Sidi Maârouf
ASSISTANCE MAÎTRISE D'ŒUVRE : Novec - Ingerop
ENTREPRISES : Seprob - Maeg (sous-traitant charpente métallique) - Freyssinet (sous-traitant haubans)

ABSTRACT

THE SIDI MAÂROUF BRIDGE IN CASABLANCA

MARIE-VÉRONIQUE PÉRON, INGEROP - M'HAMED LAZOUZI, NOVEC - MEHDI BELJIDID, NOVEC

The Sidi Maârouf Bridge is 285 metres long, with a single longitudinally inclined central pylon. The 138-metre span is suspended by a central bundle of stay cables. The inclined pylon and the two bundles of stay cables anchored on the south abutment balance the big 138-metre span. The deck consists of a composite box section on which the central stay cables are anchored, and composite cantilever girders spaced 4.00 metres apart. It has a total length of 224m. The deck is completely built and placed on its permanent supports before execution of the pylon and tensioning of the stay cables. The works are carried out on a constrained site while road traffic continues. □

EL PUENTE DE SIDI MAÂROUF EN CASABLANCA

MARIE-VÉRONIQUE PÉRON, INGEROP - M'HAMED LAZOUZI, NOVEC - MEHDI BELJIDID, NOVEC

El puente Sidi Maârouf es un puente de 285 m de longitud con un solo pylon central inclinado longitudinalmente. La luz de 138 m está suspendida por un tendido central de cables atirantados. El pylon inclinado y los 2 tendidos de cables atirantados anclados al estribo sur equilibran la gran luz de 138 m. El tablero está formado por un cajón mixto, al que están anclados los cables atirantados centrales, y ménsulas mixtas espaciadas de 4,00 m. Tiene una longitud total de 224 m. La totalidad del tablero ha sido construida e instalada sobre sus apoyos definitivos antes de realizar el pylon y tensar los cables atirantados. Las obras se llevan a cabo en un emplazamiento restringido por la circulación viaria. □

LES OUVRAGES D'ART DE LA LGV CNM

AUTEURS : YI ZHANG, CHEF DE PROJET, SPIE BATIGNOLLES GÉNIE CIVIL - DOMINIQUE REGALLET, DIRECTEUR TECHNIQUE, OC'VIA CONSTRUCTION

LA NOUVELLE LIGNE À GRANDE VITESSE (LGV) DU CONTOURNEMENT DE NÎMES ET MONTPELLIER (CNM) EST LA PREMIÈRE LIGNE MIXTE LGV EN FRANCE. SUR UNE LONGUEUR TOTALE DE 80 km (60 km DE NOUVELLE LIGNE PLUS 20 km DE RACCORDEMENTS), 183 OUVRAGES D'ART, DONT 12 VIADUCS, 1 TRANCHÉE COUVERTE ET 170 OUVRAGES D'ART COURANTS ONT ÉTÉ RÉALISÉS PENDANT UNE DURÉE DE 4 ANS (CONCEPTION ET CONSTRUCTION). AU TOTAL, 320 000 m³ DE BÉTON, 55 000 t D'ARMATURES ET 15 250 t DE CHARPENTES MÉTALLIQUES ONT ÉTÉ UTILISÉS POUR CONSTRUIRE CETTE NOUVELLE LIGNE.



© PHOTOTHÈQUE OC'VIA

1a

© PHOTOTHÈQUE OC'VIA

1b

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Le projet de la ligne ferroviaire à grande vitesse Nîmes - Montpellier (figure 1), destinée à relier Nîmes (Gard) et Montpellier (Hérault), a été confié par SNCF Réseau (anciennement Réseau Ferré de France) au groupement Oc'Via en 2012, dans le cadre d'un contrat de

partenariat public-privé sur une durée de 25 ans.

Le tracé du projet se situe dans une région avec un contexte hydraulique très sensible : de nombreux ouvrages d'art ont ainsi été réalisés afin d'assurer la transparence hydraulique de cette nouvelle ligne. Au total, 183 ouvrages d'art,

1a- Tracé CNM Gard.

1b- Tracé CNM Hérault.

1a- CNM Gard alignement.

1b- CNM Hérault alignement.

dont 13 ouvrages d'art non courants (12 viaducs et 1 tranchée couverte) et 170 ouvrages d'art courants (2 ponts mixtes à bipoutre, 11 ponts avec tablier à poutrelles enrobées, 16 PRAD, 28 PSDA, 7 PSDP, 33 portiques, 10 cadres, 3 SDM et 60 ouvrages préfabriqués Matière) ont été réali-

2a- Profil en travers de la section courante de type plateforme.

2b- Profil en travers de la section courante de type pont-rail.

2a- Cross section of the platform type standard section.

2b- Cross section of the railway bridge type standard section.

A- CATÉGORIE DES OUVRAGES D'ART CNM

Catégorie d'ouvrages d'art CNM	Nombre
Ouvrages d'art non courants	
- Viaducs	12
- Tranchée couverte	1
Ouvrages d'art courants	
- Tablier mixte à bipoutre	2
- Tablier à poutrelles enrobées	11
- Tablier à poutres précontraintes par adhérence (PRAD)	16
- Tablier dalle en béton armé (PSDA)	28
- Tablier dalle en béton précontrainte (PSDP)	7
- Portique, PIPO, PIPO sur palplanches	33
- Cadre, PICF ballastés ou enterrés	10
- Saut-de-mouton (SDM)	3
- Ouvrages préfabriqués MATIERE	60
Total	183

sés, soit 1 ouvrage tous les 437 m. Cet article présente la synthèse de ces 183 ouvrages d'art selon les informations de récolement. Il rappelle d'abord quelques informations générales du projet CNM, ensuite il décrit les particularités techniques et les contraintes

spécifiques du projet pour la conception, enfin, il récapitule les caractéristiques principales des ouvrages et leurs méthodes de construction. D'une manière générale, les ouvrages peuvent être regroupés en 2 grandes familles :

→ Les Ouvrages d'Art Non Courants (OANC) au nombre de 13 ;

→ Les Ouvrages d'Art Courants (OAC) au nombre de 170.

La décomposition détaillée des ouvrages est présentée dans le tableau A.

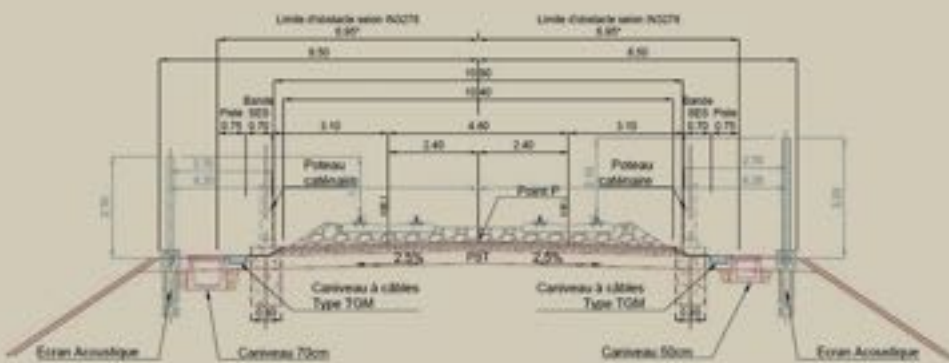
Les études d'avant-projet détaillé (APD) des ouvrages d'art se sont déroulées entre juin 2012 et juillet 2013, soit une durée d'environ un an. Ces études APD ont été menées par les ingénieries intégrées dans le groupement (Setec et Systra) et les bureaux d'études internes de Bouygues Travaux Publics et Spie Batignolles Tpci. Les études d'exécution (EXE) se sont poursuivies et terminées début 2015, soit une durée environ d'un an et demi. Au total, une dizaine de bureaux d'études ont été mobilisés pour effectuer les études EXE des ouvrages d'art. Par souci « d'industrialisation », le découpage en lots d'études se fait en fonction du type d'ouvrages, plutôt que par tronçons géographiques. Les travaux ont débuté fin 2013 et se sont terminés fin 2015, soit une durée de deux ans environ.

SPECIFICITÉS DU PROJET PARTICULARITÉS TECHNIQUES ET CONTRAINTES SPÉCIFIQUES

La LGV CNM est la première ligne à grande vitesse mixte en France. Les profils en travers de la section courante de type plateforme et pont-rail sont présentés dans la figure 2. La vitesse de conception est de 350 km/h pour les trains de voyageurs et de 120 km/h pour les trains de marchandises. Cette particularité technique a engendré certaines contraintes sur la conception des ouvrages vis-à-vis du tracé de la ligne et des charges ferroviaires, par exemple :

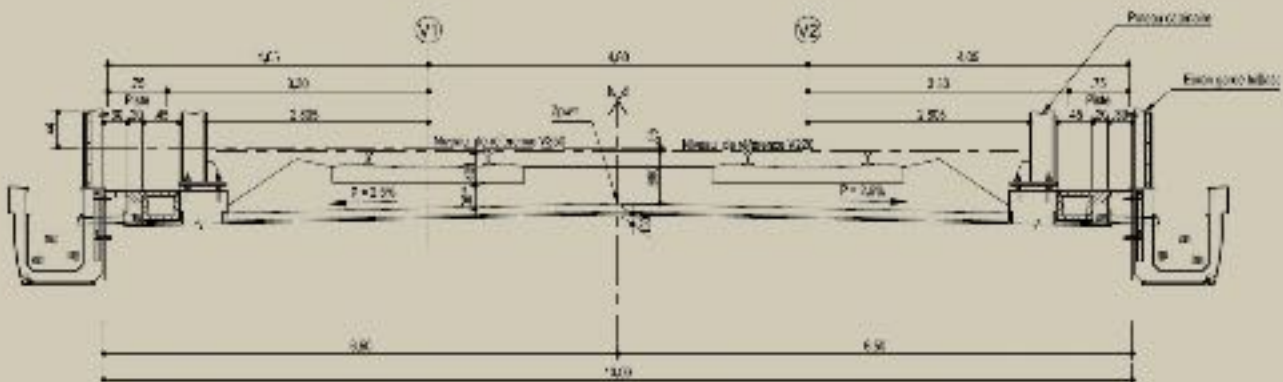
- Le rayon de courbure plus important et le devers plus contraignant ;
- La déclivité ponctuelle maximale est limitée à 13,5 mm/m et la déclivité moyenne sur une longueur de 350 m est limitée à 10 mm/m ;
- L'entraxe retenu à 4,8 m afin de limiter l'effet de souffle ;

PROFIL EN TRAVERS DE LA SECTION COURANTE DE TYPE PLATEFORME



2a

PROFIL EN TRAVERS DE LA SECTION COURANTE DE TYPE PONT-RAIL



2b

B- CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES VIADUCS

FK ou PK Médian	Nom de l'ouvrage	Commune	Description	Longueur tablier (m)	Largeur droite (m)	Biais/tracé LGV (grade)	Travées (m)	Épaisseur houldeis à l'axe (m)	Hauteur poutre (m)	Béton (m ³)	Armatures (t)	Poids charge métallique (t)
62+807 / 63+408	Viaduc du Laz et de la Lironde (SC331-0)	Yattes	Bow String (90m) / Estacade BA quadripoutre (21-31.4-28.5*4-28*5)=306.4m + appui Freyssinet / Pont mixte bipoutre (39-51*2-39)=180m	579	13.20	62 à 69 (18 appuis)	90 - 21 - 31.4 - 28.5*4 - 28*5 - 19 - 51*2 - 39	Bow String (0.391) / Estacade BA (3.409) / Bipoutre (0.43)	Bow String (2.4 à 18.25) / Estacade BA (2.38) / Bipoutre (2.65 à 3)	20 000	3 130	2 400
58+104 / 58+238	Viaduc du Vidourle (SC360-0, SC362-0, SC362-0)	Gallargues-le-Montueux & Lunel	RaPL (31.5m) / Warren (90m) / RaPL (31.5m)	159	14.10	90 (4 appuis)	31.5 - 90 - 31.5	RaPL (1.200) / Warren (0.42)	RaPL (3.3 à 5.5) / Warren (11.5 à 12.5)	8 068	1 415	1 975
57+858	Viaduc de décharge N°1 (SC376-0)	Gallargues-le-Montueux	Pont BA quadripoutre + appui Freyssinet	294	11.15	300 (13 appuis)	22.15 - 27.7 - 22.9*2 - 27.7 - 22.9*2 - 27.7 - 22.9*2 - 27.7 - 22.15	0.391	1.92	10 200	1 600	-
57+136	Viaduc de décharge N°2 (SC375-0)	Gallargues-le-Montueux	Pont BA quadripoutre + appui Freyssinet	221	13.00	77 (10 appuis)	22.15 - 27.7 - 22.9*2 - 27.7 - 22.9*2 - 27.7 - 22.15	0.391	1.92	7 400	1 240	-
58+673	Viaduc de décharge N°3 (SC366-0)	Gallargues-le-Montueux	Pont BA quadripoutre + appui Freyssinet	147	13.00	100 (7 appuis)	22.15 - 27.7 - 22.9*2 - 27.7 - 22.15	0.391	1.92	5 290	920	-
58+854	Viaduc de décharge N°4 (SC363-0)	Gallargues-le-Montueux	Pont BA quadripoutre + appui Freyssinet	147	13.00	100 (7 appuis)	22.15 - 27.7 - 22.9*2 - 27.7 - 22.15	0.391	1.92	5 290	920	-
56+119	Viaduc RN113 (SC361-0)	Almargues	Pont mixte quadripoutre	86	13.00	46 (3 appuis)	44.86 - 39.50	0.58	2.75	6 540	1 154	448
49+692	Viaduc de Sarelle (SC487-0)	Vestric-et-Candiac & Vergèze	Pont BA quadripoutre + appui Freyssinet	380	13.17	300 (13 appuis)	18.6 - 26.6 - 19.30*2 - 26.6 - 19.35*2 - 26.6 - 19.30*2 - 26.6 - 18.6	0.391	1.92	8 850	1 400	-
49+519	Viaduc du Vivre (SC495-0)	Vestric-et-Candiac	Pont mixte bipoutre	87	13.15	82.6 (3 appuis)	21.2 - 38.64 - 23.2	0.579	3.70	4 375	490	280
38+258	Viaduc A54 (SC362-0)	Calsargues	RaPL	54	14.18	56.95 (2 appuis)	51.15	0.678	5.229 à 6.7	2 258	379	716



3a



3b



3c



3d



4a



4b

© PHOTO THÉRIE CC BY A

© PHOTO THÉRIE CC BY A

© PHOTO THÉRIE CC BY A

C- CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DE LA TRANCHÉE COUVERTE DE MANDUEL

PK	Commune	Description	Longueur radier (m)	Épaisseur radier (m)	Largeur droite (m)	Épaisseur paroi moulée (m)	Hauteur maximale paroi moulée (m)	Béton (m ³)	Armatures (t)
07+120 / 08+402	Redessan & Manduel	Ripage des dalles préfabriquées + jet grouting sous voies ferrées	1 282	0.80	10.35	0.52 / 0.82	28	51 800	5 600



© PHOTO THÉQUE OC VIA 5

- 3a- Viaduc du Lez et de la Lironde (SC831-0).
- 3b- Viaduc du Vidourle (SC580-0, SC581-0 et SC582-0).
- 3c- Viaduc RN113 (SC561-0).
- 3d- Viaduc A54 (SC362-0).
- 4a- Les viaducs de décharges de la plaine du Vidourle (SC576-0, SC571-0, SC566-0 et SC563-0).
- 4b- Viaducs du Vistre (SC495-0) et de Sarelle (SC497-0).
- 5- Tranchée couverte de Manduel - vue aérienne.
- 6- Ouvrages d'art courants en bipoutre (PRA SC370-0).

→ Le gabarit international de chargement n°3 retenu est compatible avec les trains du fret et du TGV ;

→ Un coefficient $\alpha = 1,33$ est appliqué aux charges ferroviaires UIC71 et SWO.

De plus, une contrainte forte du projet est de minimiser l'impact de la nouvelle ligne sur l'environnement afin de préserver au maximum les milieux naturels concernés. En effet, cette ligne se situe

dans une zone sensible aux écoulements d'eau, la région est connue pour des épisodes cévenols (fortes pluies automnales). Compte tenu de ces contraintes spécifiques, la ligne CNM a été conçue majoritairement en remblais et de nombreux ouvrages, comme viaducs de décharges ou ouvrages hydrauliques, ont été construits afin de garantir la transparence hydraulique de cette ligne.

PRINCIPES DE CONCEPTION

La durée de vie des ouvrages de la LGV CNM est de 100 ans.

Leur conception est conforme aux exigences techniques prescrites dans les Eurocodes et les référentiels techniques LGV (documents SNCF).

Les principes de la conception structurale consistent à :

- Retenir les solutions des viaducs avec des tabliers mixtes pour le franchissement de portée importante (portée supérieure à 30 m). Cette solution de pont mixte est très compétitive sur une large gamme de brèches (40 à 120 m) par rapport à d'autres solutions comme le béton précontraint.
- Choisir les viaducs avec des tabliers aux poutres préfabriquées pour les ouvrages de portée moyenne (portée entre 20 et 30 m). Cette solution permet une mise en place sans étalement et ainsi un gain en durée de travaux.

D- CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES OUVRAGES D'ART COURANTS EN BIPOUTRE

PK Médian	Commune	Description	Longueur tablier (m)	Largeur droite (m)	Biais/tracé LGV (grade)	Travées (m)	Épaisseur hourdis à l'axe (m)	Hauteur poutre (m)
36+954	Cassargues	PRA (Ouvrage hydraulique)	341	13	100	20 - 33,25*3 - 20	0,579	2,4
35+807	Aimargues	PRA	74	3,1	78	14,908 - 21,297*2 - 14,908	0,15	0,5



© PHOTO THÉQUE OC VIA 6

- 3a- Viaduct of the Lez and Lironde (SC831-0).
- 3b- Vidourle viaduct (SC580-0, SC581-0 and SC582-0).
- 3c- Viaduct over RN113 highway (SC561-0).
- 3d- Viaduct over A54 motorway (SC362-0).
- 4a- The Vidourle plain discharge viaducts (SC576-0, SC571-0, SC566-0 and SC563-0).
- 4b- Viaducts of the Vistre (SC495-0) and Sarelle (SC497-0).
- 5- Manduel cut-and-cover tunnel - aerial view.
- 6- Double-girder standard engineering structures (PRA SC370-0).

→ Retenir les solutions classiques (PSDA, PSDP, PRAD, Poutrelles enrobées, Portique, Cadre, etc.) pour les ouvrages de portée faible (portée inférieure à 25 m).

La plupart des ouvrages se situe dans une zone de sismicité faible, une petite partie est dans une zone de sismicité modérée selon la délimitation des zones sismiques dans le décret du 22 octobre 2010. Les principes de conception parasismique consistent à reprendre les efforts sismiques par :

→ Des appareils d'appui à pot et des butées anti-sismiques pour les viaducs avec des tabliers mixtes. Des appareils d'appuis fixes reprennent les efforts horizontaux en service y compris les efforts sismiques à l'ELS, les butées anti-sismiques ne reprennent que les efforts horizontaux à l'ELU sismique (trop importants pour être repris par les appareils d'appui à pot). Certains appareils d'appui à pot anti-décollement sont utilisés sur les viaducs très biaux.

→ Des articulations en béton avec des tiges précontraintes (appuis de type Freyssinet) pour les viaducs avec des tabliers à poutres béton armé préfabriquées et certains PRA dalle en béton armé.

→ Des appareils d'appuis en néoprène ou à pot pour le reste des ouvrages, certains appareils d'appui à pot anti-décollement sont utilisés sur les culées des ouvrages avec tablier à poutrelles enrobées.

En outre, pour les PRA, les effets dynamiques sont analysés suivant les prescriptions dans l'Eurocode 1 avec le passage des 10 convois HSLM jusqu'à $1,2 \times V_{max}$, soit 420 km/h. Les critères à respecter sont :

→ L'accélération verticale du tablier est limitée à $3,5 \text{ m/s}^2$ pour une voie ballastée.

→ Le gauche du tablier est limité à :

- $1,5 \text{ mm/3 m}$ pour une vitesse $> 200 \text{ km/h}$;
- 3 mm/3 m pour une vitesse entre 120 et 200 km/h.

→ La flèche maximale du tablier sous trafic ferroviaire, mesurée le long de chacune des voies, est limitée à L/600 dans le cas général, et à L/800 dans le cas d'un ouvrage à 2 voies lorsqu'une seule voie est chargée.

→ La rotation aux extrémités du tablier est limitée à 2 mm/hauteur du tablier.

Enfin, les efforts issus de l'Interaction Rail Structure (IRS) sont calculés sui-

E- CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES OUVRAGES D'ART COURANTS À POUTRELLES ENROBÉES

PK Médian	Commune	Description	Longueur tablier (m)	Longueur droite (m)	Biais/tracé LGV (grade)	Travées (m)	Épaisseur tablier (m)	Profilé et espacement (m)
37+087	Manduel	PRA	111	13,12	88	55,54 - 25,43 - 25,42*2 - 35,52	1,31	HL 1000x483 / 0,712
42+243	Milhaud	PRA	48	13,04	72	12,25 - 18,48 - 14,78	1,06	W690x350x500 / 0,600
43+347	Milhaud	PRA (Ouvrage hydraulique)	90	13,08	100	17,49 - 26,9*2 - 17,49	1,43	HL 1100x607 / 0,670
50+219	Vergèze	PRA	67	13	79	18 - 30 - 18	1,404	HLR 1100 / 0,555
55+907	Ainargues	PRA	74	13,1	78	14,899 - 21,204*2 - 14,899	1,29	HLR 1000 / 0,590
58+626	Lunel	PRA	70	13	90	19,3 - 29,87 - 19,3	1,41	HLR 1100 / 0,571
58+797	Lunel	PRA	54	13	71	15,09 - 23,16 - 15,09	1,39	HLR 1100 / 0,571
81+376	Montpellier	PRA	504	22,5	100	20,15 - 31*2 - 20,15	1,125	HEA 900 / 0,750
82+452	Montpellier	PRA	52	2 x 13	100	14,7 - 21 - 14,7	1,27	HEB 900 / 0,750
84+305	Lattes	PRA (Ouvrage hydraulique)	74	13	81	23 - 26 - 23	1,43	HL 1100 / 0,705
82+359	Lattes	PRA sur remblai renforcé V50L	32	11,6	95	31,27	1,38	HEB 1000 / 0,777



© PHOTO THÉOCCVMA

vant les prescriptions de l'Eurocode 1 sous les charges ferroviaires verticales, les effets thermiques et les actions dues à l'accélération et au freinage.

Outre ces efforts à transmettre aux appuis, les critères à respecter sont :

→ Les contraintes additionnelles dans les rails de type UIC 60 sont limitées à :

- 72 MPa en compression ;
- 92 MPa en traction.

→ Le déplacement longitudinal à l'extrémité du tablier sous les actions dues à l'accélération et au freinage est limité à 5 mm pour les longs rails soudés sans dispositif de dilatation.

→ Le déplacement longitudinal à l'extrémité du tablier sous les charges verticales du trafic est limité à 8 mm lorsque l'on tient compte

7- Ouvrages d'art courants à poutrelles enrobées - vue au-dessous du tablier (PRA SC423-0).

7- Composite joist standard engineering structures - deck underside view (PRA SC423-0).

du comportement combiné voie-ouvrage.
→ Le déplacement vertical à l'extrémité du tablier est limité à 2 mm pour une vitesse $> 160 \text{ km/h}$.

OUVRAGES D'ART NON COURANTS (OANC)

Il y a au total 13 ouvrages d'art non courants, dont 12 viaducs et 1 tranchée couverte.

VIADUCS

Les caractéristiques principales des 12 viaducs sont récapitulées dans le tableau B. Deux types de viaducs ont été conçus, à savoir :

→ Les viaducs avec tablier mixte (figure 3) ;

→ Les viaducs avec tablier à poutres béton armé (figure 4).

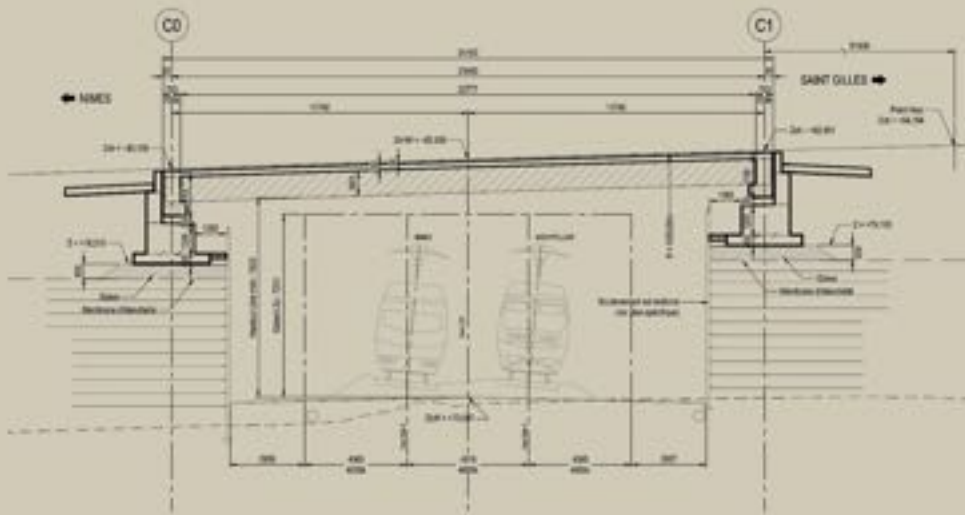
Les viaducs sont tous fondés sur les pieux sauf le viaduc SC362-0, fondé sur des semelles superficielles.

La longueur des pieux varie de 10 m à 39 m avec un diamètre de 1 m à 2 m. Les pieux sont construits avec des

F- CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES OUVRAGES D'ART COURANTS DE TYPE PRAD

PK Médian	Commune	Longueur tablier (m)	Largeur droite (m)	Blais/tracé LGV (grade)	Travées (m)	Épaisseur hourdis à l'axe (m)	Largeur talon, hauteur et espacement poutre préfa (m)	Torons et poids câbles (t)
01+410	St Gervasy	22	9.5	80	21.44	0.23	0.47 / 0.85 / 1.190	18T15 / 3.37
02+814	St Gervasy	24	8	70	22.90	0.23	0.47 / 0.85 / 1.145	18T15 / 3.15
04+857	Manduel	24	8	70	22.91	0.23	0.47 / 0.85 / 1.145	18T15 / 3.15
05+614	Manduel	22	12.26 / 12.00	82	21.545	0.23	0.47 / 0.90 / 1.227 et 1.200	20T15 et 24T15 / 9.59
30+160	Manduel	24	8	100	23.4	0.245	0.37 / 1.05 / 1.145	16T15 / 2.86
32+143	Bouffargues	25	8	80	24.6	0.245	0.37 / 1.05 / 1.145	20T15 / 3.76
32+961	Bouffargues	26	8	75	24.948	0.245	0.37 / 1.05 / 1.145	20T15 / 3.81
37+318	Nîmes	24	12.13 / 12.13	95	23.48	0.23	0.57 / 1.00 / 1.350	19T155 / 9.46
43+410	Aubord	24	10.05	94	23.5	0.23	0.57 / 1.00 / 1.315	18T155 / 3.99
44+790	Aubord	24	8	100	23.4	0.23	0.57 / 1.00 / 1.315	16T155 / 2.65
46+783	Beauvoisin	24	8	100	23.4	0.23	0.57 / 1.00 / 1.315	16T155 / 2.65
59+600	Lunel	24	9	100	23.4	0.23	0.57 / 1.00 / 1.502	18T155 / 2.98
60+859	Lunel	27	11.6	70	26.24	0.23	0.57 / 1.15 / 1.432	19T155 / 4.70
73+369	Mauguio	26	14.3	76	25.17	0.23	0.57 / 1.10 / 1.432	18T155 / 5.34
74+636	Mauguio	24	14.3	100	23.4	0.23	0.57 / 1.00 / 1.432	17T155 / 4.69
78+895	Mauguio	25	11.6	83	24.26	0.23	0.57 / 1.05 / 1.180	14T155 / 4.01

COUPE LONGITUDINALE DES OUVRAGES D'ART COURANTS DE TYPE PRAD SUR MASSIF VSOL (PRO SC372-0)



8a



8b

8a- Coupe longitudinale des ouvrages d'art courants de type PRAD sur massif VSOL (PRO SC372-0).
8b- Ouvrages d'art courants de type PRAD sur massif VSOL (PRO SC372-0).

8a- Longitudinal section of standard engineering structures of the bonded pre-tensioned type on VSOL foundation (PRO SC372-0).

8b- Standard engineering structures of the bonded pre-tensioned type on VSOL foundation (PRO SC372-0).

méthodes classiques : foré à la tarière creuse, foré sous boue, foré tubé, etc. Compte tenu des tassements importants dans certaines zones, des pré-chargements avec anticipation de la surcharge ferroviaire ont été réalisés (par exemple sur les viaducs SC561-0, SC563-0 et SC566-0).

Les piles des viaducs ont des gammes de hauteur similaires (5 à 7 m). Ces fûts de formes diverses (circulaires, sections pleines oblongues avec les abouts en ogive, etc.) sont réalisés à l'aide d'un coffrage outil spécifique en bois associé à train de banches de coffrage métalliques.

Pour les viaducs franchissant les cours d'eau, les faces planaires des fûts sont orientées perpendiculairement à l'axe longitudinal des viaducs, ceci permet de limiter l'impact des piles sur l'écoulement de l'eau afin d'assurer la transparence hydraulique des ouvrages. Pour les viaducs avec tablier mixte, les plaques métalliques sont de nuance S 355 K2+N, S 355 N et ML conformément à la norme EN 10025.

Les charpentes métalliques sont d'abord fabriquées dans les ateliers des charpentiers. Elles sont ensuite transportées sur place en convois routiers et assemblées au sol sur des plateformes aménagées derrière les culées des ouvrages.

La mise en place de ces charpentes métalliques est principalement effectuée par lançage avec un avant-bec et occasionnellement un arrière-bec à l'aide des vérins ou du système treuil-moufle.

Un RaPL du viaduc du Vidourle est directement mis en place par grutage. Les hourdis supérieurs sont bétonnés sur des prédalles ou des coffrages perdus de type Viroc posés sur les charpentes métalliques. Les hourdis inférieurs consistent à des dalles préfabriquées et clavés sur place.

Pour les viaducs avec tablier à poutres en béton armé, les poutres sont préfabriquées sur la zone de préfabrication dédiée au chantier, transportées par convoi exceptionnel sur site et mises en place sur les appuis à l'aide d'une grue mobile. Les entretoises transversales sont ensuite coffrées et bétonnées. Le tablier est coulé sur place avec des prédalles posées sur les poutres préfabriquées. Un équipage mobile est utilisé pour réaliser le coffrage et le ferrailage du hourdis. Une fois les hourdis réalisés, les tiges précontraintes (appuis de type Freyssinet) sont mises en tension, ancrant les tabliers sur les appuis.

TRANCHÉE COUVERTE

La tranchée couverte de Manduel a une longueur de 1282 m. Les caractéristiques principales de la tranchée sont récapitulées dans le tableau C. Afin de limiter au maximum l'impact de la construction de la tranchée sur la circulation ferroviaire, 2 dalles de couverture sont préfabriquées et mises en place sous les lignes ferroviaires lors de week-ends d'interruption de circulation (figure 5).

Cette tranchée se compose de :

- 2 dalles préfabriquées (avec galeries latérales) respectivement de 3000 t et 4000 t, ripées par Kamag sous le faisceau ferroviaire TGV et RFN ;
- 1 zone centrale en U reliant les 2 dalles préfabriquées ;
- 1 zone en jet grouting en sous-œuvre (au droit des 2 dalles préfabriquées et de la zone centrale) pour obtenir des colonnes de 1,5 m de diamètre et de 5 MPa de résistance, une fois le jet grouting achevé, les excavations en taupe sont réalisés ;
- 2 zones en parois moulées classiques (e = 0,82 m) avec des butons en tête des parois tous les 3 m ;
- 2 zones en parois moulées classiques (e = 0,82 ou 0,52 m) sans butons ;
- 1 zone de l'extension côté Nîmes avec une section en U ;
- 1 station de pompage avec un réservoir sous les voies dans la largeur de la tranchée.

G- CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES OUVRAGES D'ART COURANTS DE TYPE PSDA

PK Médian	Commune	Description	Longueur tablier (m)	Largeur droite (m)	Biais/tracé LGV (grade)	Travées (m)	Épaisseur tablier à l'axe (m)
05+546	Manduel	PRA (Ouvrage Hydraulique)	41	12	100	8.1 - 11.55*2 - 8.1	0.825
05+724	Manduel	PRA (Ouvrage Hydraulique)	83	12	84	13.75 - 17 - 20 - 17 - 13.75	1.325
34+403	Garons	PRA	37	13	100	10.8 - 13 - 10.8	0.91
37+300	Nîmes	PRO	46	2 x 11.72	89	12.932 - 20 - 12.85	0.948
39+227	Nîmes	PRA (Ouvrage Hydraulique)	75	13	69	16.407 - 19.971*2 - 16.407	1.34
42+766	Milhaud & Aubord	PRA (Ouvrage Hydraulique)	99	13.1	100	14 - 20 - 16.7*3 - 14	1.33
43+748	Aubord	PRA (Ouvrage Hydraulique)	40	13.12	100	10.9 - 16.5 - 10.9	1.18
49+121	Vestric-et-Candiac	PRA	43	13.1	69	11.902 - 17.002 - 11.902	1.181
52+043	Codognan	PRA (Ouvrage Hydraulique)	77	13.04	65	12.722 - 16.615*2 - 16.415 - 12.722	1.24
53+974	Le Cailar & Aimagues	PRA (Ouvrage Hydraulique)	127	13	80	12.765 - 18.221 - 18.237 - 20.144 - 20.165 - 20.187 - 16.418	1.331
58+372	Lunel	PRA (Ouvrage Hydraulique)	61	13.08	100	12.25 - 17.5*2 - 12.25	1.15
61+535	Saturargues	PRO	52	5	100	16 - 18.5 - 16	0.9
63+901	Lunel Viel	PRA (Ouvrage Hydraulique)	81	13	100	12 - 17*2 - 20 - 14	1.35
65+727	Lunel Viel	PRA (Ouvrage Hydraulique)	70	13	75	14.024 - 20.013 - 19.99 - 13.98	1.35
67+467	Valergues	PRA	83	13	56	12.95 - 18.5*3 - 12.95	1.25
68+057	Valergues	PRA (Ouvrage Hydraulique)	75	13	79	17 - 20 - 20 - 17	1.35
70+230	Saint Brès & Mudaison	PRA (Ouvrage Hydraulique)	68	13	100	10.5 - 15*3 - 10.5	1.1
70+466	Mudaison	PRA (Ouvrage Hydraulique)	70	13	75	14 - 20*2 - 14	1.35
71+541	Mudaison	PRA (Ouvrage Hydraulique)	42	13.1	100	11.55 - 16.5 - 11.55	1.1
72+720	Mudaison	PRA (Ouvrage Hydraulique)	39	13.1	100	10.85 - 15.5 - 10.85	1.05
72+862	Mudaison & Mauguio	PRA (Ouvrage Hydraulique)	78	13	86	11.509 - 16.509 - 20.013 - 16.486 - 11.48	1.35
75+894	Mauguio	PRA (Ouvrage Hydraulique)	47	13.1	100	13.2 - 19 - 13.2	1.3
76+713	Mauguio	PRA (Ouvrage Hydraulique)	70	13.13	100	14 - 20*2 - 14	1.35
76+915	Mauguio	PRA (Ouvrage Hydraulique)	49	13.1	90	13.803 - 19.803 - 13.803	1.35
77+036	Mauguio	PRA (Ouvrage Hydraulique)	34	13.1	100	9.45 - 13.5 - 9.45	1
78+588	Mauguio	PRA (Ouvrage Hydraulique)	45	13.05	100	13.5 - 16 - 13.5	1.1
83+642	Lattes	PRA (Ouvrage Hydraulique)	56	13.1	72	15.75 - 22 - 15.75	1.35
84+417	Lattes	PRA (Ouvrage Hydraulique)	45	13	100	12.6 - 18 - 12.6	1.25

H- CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES OUVRAGES D'ART COURANTS DE TYPE PSDP

PK Médian	Commune	Description	Longueur tablier (m)	Largeur droite (m)	Biais/tracé LGV (grade)	Travées (m)	Épaisseur tablier à l'axe (m)	Terons et poids câbles (t)
05+614-1	Manduel	PRO (Ouvrage hydraulique)	58	24	62.550 à 70.931	16.792 - 21.341 - 15.915	0.8	27x19T155 / 34.55
05+614-2	Manduel	PRO (Ouvrage hydraulique)	69	12.11 / 12.00	100	14 - 16.7 - 20 - 16.7	0.8	2x14x19T155 / 42.34
29+148	Manduel	PRO	67	10.83	59	15.75 - 18.5*2 - 12.5	0.92	12x19T155 / 22.26
33+600	Garons	PRO	60	20.3	43.281 à 48.146	17.408 - 23.541 - 16.368	0.86	22x19T155 / 28.89
81+232	Saturargues	PRO	80	21.340 à 24.503	70	17.396 - 23.589 - 17.396	1.13	24x19T155 / 32.04
64+875	Lunel Viel	PRO	68	11.6	95	21.065 - 24.576 - 21.065	1	14x19T155 / 21.24
79+832	Mauguio	PRO	71	4.51 / 7.75	90	21.5 - 26 - 21.5	1.25	(11+8)x19T155 / 29.82



© PHOTOTHÈQUE CC/VIA
9a



© PHOTOTHÈQUE CC/VIA
9b



© PHOTOTHÈQUE CC/VIA
10

9a- Ouvrages d'art courants de type PSDA (PRA SC428-0).

9b- Ouvrages d'art courants de type PSDP (PRO SC648-0).

10- Ouvrages d'art courants de type portique (SC640-0).

9a- Standard engineering structures of the reinforced concrete slab overpass type (PRA SC428-0).

9b- Standard engineering structures of the prestressed slab overpass type (PRO SC648-0).

10- Standard engineering structures of the portal type (SC640-0).

OUVRAGES D'ART COURANTS (OAC)

Il y a au total 170 ouvrages d'art courants. Différents types de structure ont été choisis, à savoir :

- 2 bipoutres métalliques (tableau D et figure 6) ;
- 11 TPE (tablier à poutrelles enrobées) ;
- 16 PRAD (tablier à poutres précontraintes par adhérence) ;
- 28 PSDA (pont dalle en béton armé) ;
- 7 PSDP (pont dalle en béton précontraint) ;
- 33 ouvrages d'art de type Portique, PIPO, PIPO sur palplanches ;
- 10 ouvrages d'art de type Cadre, PICF ballastés ou enterrés coulés en place ;

- 3 SDM (saut de mouton) ;
- 60 ouvrages préfabriqués Matière :
 - 10 voûtes dont 2 doubles de 3 à 8 m d'ouverture ;
 - 49 Opticadres de forme rectangulaire de type PICF de 3 à 7,5 m d'ouverture ;
 - 1 Optidalle de type PIPO de 8 à 10 m d'ouverture.

Le pont avec tablier à poutrelles enrobées (TPE) est une structure robuste, il permet de franchir une portée jusqu'à une trentaine de mètres sans échafaudage du tablier (tableau E et figure 7). L'épaisseur du tablier est souvent faible, l'ossature porteuse est constituée par des profilés laminés, faiblement espacés, et du béton d'enrobement, peu sollicité.

Le pont en poutres précontraintes par adhérence (PRAD) est une solution classique pour le franchissement de portées allant d'une vingtaine à une trentaine de mètres (tableau F et figure 8). Ses avantages résident essentiellement dans la préfabrication des poutres précontraintes en usine et l'absence d'échafaudage pour le coulage du hourdis. Les entretoises sont disposées uniquement aux extrémités des travées. Par contre, l'épaisseur du tablier est importante. Ce caractère engendre des inconvénients lorsque le tirant d'eau est limité et sur le volume des remblais d'accès à l'ouvrage. Dans le projet CNM, les PRAD sont tous des PRO posés sur des remblais renforcés de type VSoL (figure 8).

Le pont dalle en béton armé (PSDA) ou en béton précontraint (PSDP) est une conception classique pour une portée d'une dizaine à une vingtaine de mètres (tableaux G, H et figure 9). Il se révèle économique dans la gamme de ses

I- CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES SAUTS DE MOUTON

PK Médian	Commune	Description	Longueur tablier (m)	Largeur droite (m)	Biais/tracé LGV (grade)	Épaisseur guidroits (m)	Épaisseur tablier à l'axe (m)	Hauteur portique (m)	Tonnes et poids câbles (t)
00+962	Lattes	PRAD	90	9,47	18	0,7	0,968	8,8	-
01+473	Lattes	PRAD + poutres précontraintes préfabriquées pour la traverse	119	18,1	13	1,2	1,061	5,8	227135 / 46,91
03+128	Valergues	PRAD + poutres BA préfabriquées pour la traverse	79	19,3	26	1,11	1,1	7,2	-



11

© PHOTO THÉRIE CC BY SA

portées. De plus, la faible épaisseur du tablier lui confère une ligne discrète du point de vue architectural.

Les ouvrages de type cadre sont utilisés pour franchir une portée allant à une dizaine de mètres (figure 13). Ils peuvent être fondés sur tous les types de sols acceptant une fondation superficielle peu chargée. Les ouvrages de type portique (figure 10) assurent la relève du cadre pour une portée

11- SDM Lattes (RL015-2).

12- OAC voûtes préfabriquées Matière (SC834-0).

11- Lattes flyover (RL015-2).

12- Matière préfabriquée, roofed standard engineering structures (SC834-0).

d'une dizaine jusqu'à une vingtaine de mètres.

Le saut-de-mouton permet le croisement des deux voies. L'ouvrage est constitué d'un cadre ou un portique en béton armé prolongé souvent par des murs de soutènement (tableau I et figure 11).

Des méthodes de construction différentes sont utilisées sur ces ouvrages courants :



12

© PHOTO THÉRIE CC BY SA



© PHOTO: HÉCQUE MATIÈRE

13

sont réalisées au moyen de massifs en sol renforcé VSoL (figure 8), qui reprennent les charges issues du chevêtre et du tablier. Le principe du système VSoL consiste à créer un mur de soutènement stable et pérenne. Il se compose d'un dispositif d'armatures en acier galvanisé en forme d'échelles, disposées dans le remblai technique de l'ouvrage. Ces armatures sont fixées à l'arrière des panneaux de parement.

Les ouvrages voûtés préfabriqués par Matière sont souvent des ouvrages de portée inférieure à dix mètres (figure 12). Les ouvrages Opticadre (figure 13) sont découpés longitudinalement et transversalement en 2, 3 ou 4 éléments, et peuvent être reliés transversalement entre eux par un dispositif de liaisonnement. □

13- Opticadre Matière.

13- Matière Opticadre frame.

→ Soit coulés sur place à l'aide de coffrages (perdus) et d'étaisements (échafaudages porteurs ou cintres) ;
 → Soit préfabriqués (de type Matière).
 Dans le processus constructif de coulage sur place, les semelles sont coffrées avec des coffrages manportables, les piles sont coffrées avec des banches métalliques. Les étaisements de type passe charretière sont réalisés pour la construction du tablier des ponts PSDA et PSDP. Les coffrages perdus de type Viroc ou les prédalles sont utilisés pour la construction du tablier des ponts TPE. De plus, afin de réaliser le franchissement des voies en respectant le planning, les culées des ouvrages PRAD

PRINCIPALES QUANTITÉS

- BÉTON :**
320 000 m³
- ACIERS PASSIFS :**
55 000 t
- CHARPENTE MÉTALLIQUE :**
5 750 t
- POUTRELLES MÉTALLIQUES :**
9 500 t
- CÂBLES PRÉCONTRAINTES :**
330 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRE D'OUVRAGE :** Oc'Via et SNCF Réseau (anciennement Réseau Ferré de France)
- TYPE DE CONTRAT/MARCHÉ :** Partenariat Public Privé
- MAÎTRES D'ŒUVRE INTÉGRÉS :** Setec et Systra
- ARCHITECTE :** Alain Spielmann
- ÉTUDES D'EXÉCUTION :** Agco (Artes/C2oda/Grontmij/Otce), Bmci, Aia, Arcadis, Spie Batignolles Tpci, Secoa, Cogeci, Siam, Seti, Ingerop, Matière
- GROUPEMENT CONSTRUCTEUR**
- TERRASSEMENT ET GÉNIE CIVIL :** Oc'Via Construction (Bouygues Construction, Colas, Colas Rail, Spie Batignolles, Alstom)
- CHARPENTE MÉTALLIQUE (SOUS-TRAITANTS) :** Zwahlen & Mayr, Matière, Baudin Châteauneuf

ABSTRACT

ENGINEERING STRUCTURES FOR THE CNM HSL

YI ZHANG, SPIE BATIGNOLLES GÉNIE CIVIL - DOMINIQUE REGALLET, OC'VIA CONSTRUCTION

The article presents an overview of the engineering structures executed within the framework of the CNM HSL project (high-speed rail bypass between Nîmes and Montpellier), the first high-speed line of a mixed type in France, with a total length of 80km. This special technical feature created structure design constraints with regard to the line's alignment and rail loads. Moreover, this line is located in a very sensitive region with water runoff. Numerous hydraulic structures have been built to ensure its hydraulic transparency. All in all, this line comprises 183 engineering structures: 13 non-standard structures (12 viaducts and 1 cut-and-cover tunnel) and 170 standard engineering structures, including 2 double-girder composite bridges, 11 bridges with composite-joist deck, 16 bonded pre-tensioned beams, 28 reinforced concrete slab overpasses, 7 prestressed slab overpasses, 33 portal frames, 10 frames, 3 flyovers and 60 structures prefabricated by Matière, i.e. 1 engineering structure every 437m. □

LAS OBRAS DE FÁBRICA DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD CNM

YI ZHANG, SPIE BATIGNOLLES GÉNIE CIVIL - DOMINIQUE REGALLET, OC'VIA CONSTRUCTION

El artículo presenta una síntesis de las obras de fábrica realizadas en el marco del proyecto de alta velocidad CNM (Circunvalación Nîmes Montpellier), la primera línea de alta velocidad de carácter mixto en Francia, con una longitud total de 80 km. Esta especificidad técnica ha limitado el diseño de las obras en términos de trazado de la línea y cargas ferroviarias. Además, esta línea se encuentra en una zona muy sensible a las escorrentías. Se han construido numerosas obras hidráulicas para garantizar su transparencia hidráulica. En total, esta línea consta de 183 obras de fábrica: 13 obras de fábrica no corrientes (12 viaductos y 1 zanja cubierta) y 170 obras de fábrica corrientes, entre las cuales 2 puentes mixtos bi-viga, 11 puentes con tablero con viguetas revestidas, 16 vigas pretensadas por adherencia, 28 pasos superiores de losa armada, 7 pasos superiores de losa pretensada, 33 pórticos, 10 marcos, 3 pasos elevados y 60 obras prefabricadas Matière, lo que representa 1 construcción cada 437 m. □



1
© THIERRY DAVID/SUD-OUEST

EXTENSION DE LA LIGNE C DU TRAMWAY DE BORDEAUX - OUVRAGE DE FRANCHISSEMENT DE LA ROCADE

AUTEURS : THOMAS CHAVIGNIER, CHEF DE PROJET MOE, ARTELIA - LOÏC PEDEZERT, DIRECTEUR TRAVAUX, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - LUDOVIC PICARD, CHEF DE SECTEUR OUVRAGES D'ART, EIFFAGE/BIEP - JONATHAN STAMP, INGÉNIEUR RESPONSABLE D'AFFAIRE, EIFFAGE/BIEP

L'EXTENSION DE LA LIGNE C DU TRAMWAY DE BORDEAUX MÉTROPOLÉ PRÉVOIT LE FRANCHISSEMENT DE LA ROCADE SUR LE TERRITOIRE DE LA COMMUNE DE VILLENAVE-D'ORNON. LA CONSTRUCTION D'UN OUVRAGE AU DROIT D'UNE ROUTE À GRANDE CIRCULATION ENGENDRE NÉCESSAIREMENT DES CONTRAINTES IMPORTANTES. CET ARTICLE DÉCRIT LA CONCEPTION INITIALE DE CET OUVRAGE, LA SOLUTION VARIANTE DE L'ENTREPRISE CONÇUE POUR LIMITER ENCORE DAVANTAGE LES IMPACTS SUR LE TRAFIC, ET SA CONSTRUCTION.

CONTEXTE GÉNÉRAL - LE PROJET

CONTEXTE GÉNÉRAL

Le nouveau pont de la Maye construit dans le cadre de l'opération d'extension de la nouvelle Ligne C de tramway est situé sur le territoire de la commune de Villenave-d'Ornon de la Métropole Bordelaise, dans le département de la Gironde. Il est implanté parallèlement au pont routier existant (échangeur 18)

portant le même nom, qui porte la D1113 (route de Toulouse/avenue des Pyrénées).

Ce nouveau pont est prévu pour la circulation de deux voies de tramway, avec un cheminement de service d'un côté et de l'autre, une piste pour la circulation des cycles, pour une largeur totale de 10,28 m (figure 2).

Par ailleurs, il doit témoigner de l'identité du tramway bordelais à travers

quelques signes distinctifs mais doit rester discrets et en cohérence avec son environnement.

**1- Grutage
des poutres.**

**1- Beam
hoisting.**

DONNÉES ET CONTRAINTES PRINCIPALES

Le pont de la Maye existant a été construit au début des années 70 et comporte un tablier hyperstatique à 4 travées constitué d'une dalle en béton précontraint de type PSI-DP,

qui supporte une chaussée routière d'une largeur utile totale de 18,00 m. Le contexte géologique du secteur étudié est constitué d'alluvions et colluvions argilo-sableuses recouvrant la formation des Calcaires à Astéries. Ces 2 formations présentent des caractéristiques très hétérogènes en raison des variations très rapides, tant horizontalement que verticalement, et en raison des hétérogénéités au sein des faciès eux-mêmes. La formation des Calcaires à Astéries, présente des passages plus ou moins compacts à très compacts (constitués de blocs et bancs calcaires) qui peuvent s'intercaler au sein de bancs plus ou moins altérés liés au phénomène de karstification de ce faciès. Le profil en long de la plateforme du tramway est contraint par la nécessité de traverser à niveau une voie d'insertion routière, et définit ainsi la surface de l'extrados du tablier. Par ailleurs, l'intrados est, quant à lui, contraint par la nécessité de dégager le même tirant d'air que celui du pont routier existant. La rocade à franchir par le nouveau pont est composée de 7 voies de circulation : 3 voies dans le sens intérieur et 4 dans le sens extérieur, incluant

une voie d'insertion. La construction au-dessus de la rocade génère plusieurs contraintes, d'autant plus que l'ouvrage se localise dans un des tronçons les plus congestionnés de la rocade de Bordeaux, avec un trafic de près de 130 000 véhicules par jour, dont 12% de poids lourds. Cette exigence nécessite plusieurs modifications temporaires et provisoires des mesures d'exploitation.

Les travaux des appuis de rive et de l'appui central en TPC imposent de reconfigurer la rocade dans le cadre de deux phases provisoires, avec de lourdes interventions sous exploitation chantier, dont notamment la réalisation d'un TPC provisoire de plus de 8,00 m pour les travaux de la pile centrale, l'ensemble conduisant à un surcoût non négligeable.

SOLUTION DE BASE

La première contrainte considérée a été la recherche du mimétisme du pont existant souhaité par le maître d'ouvrage et de répondre à une programmation d'ouvrage d'art courant, alliant simplicité et sobriété.

La seconde contrainte concernait les conditions d'exploitation sous chantier, avec l'hypothèse d'une circulation ne pouvant pas être interrompue compte tenu du contexte de trafic congestionné, et qu'il n'était pas souhaité de couler en place sur cintre au-dessus de la rocade en exploitation.

Initialement, la solution retenue est un ouvrage de type pont-dalle monolithique continu en béton précontraint par post tension avec une travure identique à celle du pont de la Maye existant. ▷

2- Coupe transversale type.

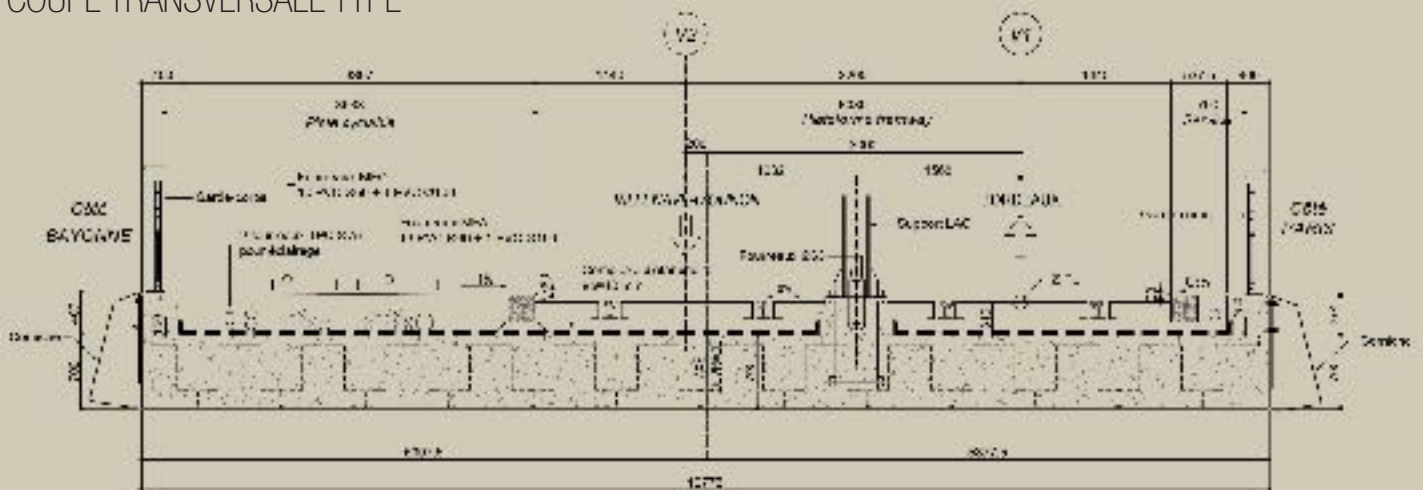
3- Élévation de la solution variante.

2- Typical cross section.

3- Elevation view of the variant solution.

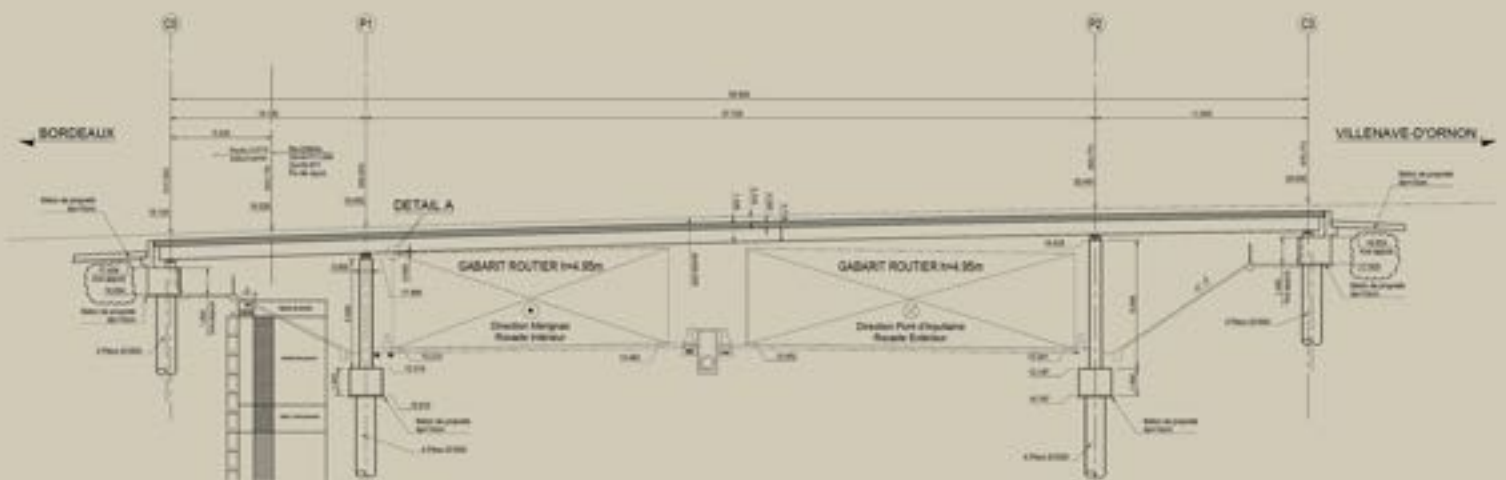
© ARTELIA

COUPE TRANSVERSALE TYPE



2

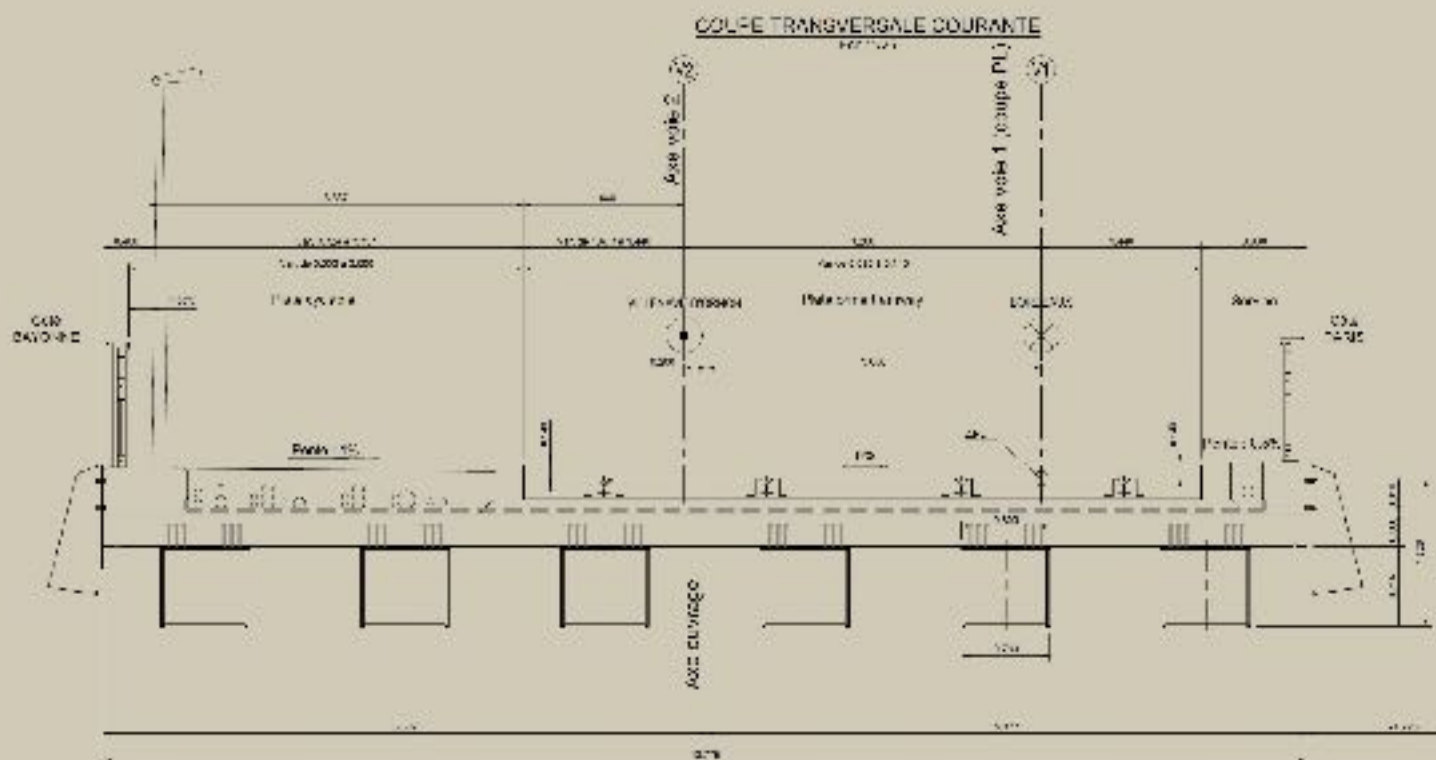
ÉLÉVATION DE LA SOLUTION VARIANTE



3

© EIFFAGE

COUPE TRANSVERSALE TYPE DU TABLIER



4

© EIFFAGE

Mis en place par une opération de poussage de nuit depuis une plateforme de préfabrication, ce mode constructif limite les interfaces avec l'exploitation de la rocade et permet le maintien la circulation de la rocade pendant le poussage. Par ailleurs l'aspect monolithique du tablier offre une bonne robustesse vis-à-vis des chocs, étant donné que le tirant d'air est en dessous des 5,00 m, mais il est nécessaire de mettre en place une précontrainte antagoniste pour la phase de poussage.

En variante, une solution avec un tablier cette fois-ci constitué de poutres préfabriquées selon la technique dite des poutres-dalles a été proposée. Il s'agit de poutres précontraintes par pré-tension préfabriquées en usine, présentant une section en « Té inversé ». Cette technique permet de reconstituer une dalle monolithique d'épaisseur totale 70 cm et d'obtenir in fine un ouvrage à l'aspect extérieur et aux proportions identiques à ceux de l'ouvrage existant. Ainsi, comme pour le pont existant, cette solution propose un biais de 79,50 grades, avec des portées biaisées égales respectivement à 10,10 m, 17,66 m, 20,06 m et 11,00 m, pour une longueur totale de tablier

de 60,09 m. Cette technique permet un ouvrage d'apparence identique à l'existant, avec un élargement et un balancement de 1/28 et de 0,56 respectivement.

Lors de l'établissement du dossier de consultation des entreprises et de la confirmation définitive du volume important de travaux liés à la réalisation de la pile centrale en TPC, il a été décidé d'ouvrir à variante sur la travure et sur le type de tablier dans le but de rechercher des solutions sans appui en TPC tout en respectant les contraintes de voie ferrée et de tirant d'air. Il est donc attendu que soient proposés des ouvrages d'art non-courants, changeant ainsi une des exigences programmatiques du maître d'ouvrage.

LA SOLUTION VARIANTE DE L'ENTREPRISE PRÉSENTATION

En solution de base, le tablier avait une épaisseur de 0,70 m. L'ouvrage présentait en hauteur un sur-gabarit de l'ordre de 0,35 m par rapport au gabarit routier minimum de 4,95 m. Il était donc possible d'augmenter l'épaisseur du tablier.

Le principe de la solution variante consiste à supprimer l'appui en TPC

4- Coupe transversale type du tablier.

4- Typical cross section of the deck.

de l'ouvrage et à modifier la structure du tablier (figure 3).

Ainsi la portée de la travée principale atteint 37,72 m.

Afin de préserver le gabarit routier, il convenait de limiter l'augmentation d'épaisseur du tablier à environ 30 cm malgré le doublement de la portée par rapport à la solution de base. Une solution à poutres en béton n'aurait pas permis de respecter ce critère. Un tablier à poutrelles enrobées aurait présenté un surcoût important lié à la fois à ses quantités d'acier et de béton ainsi qu'à l'augmentation significative des descentes de charges sur les fondations des deux piles restantes.

Il a donc été retenu un tablier de type multipoutres mixtes. Les principales contraintes pour le dimensionnement de ce tablier ont été les suivantes :

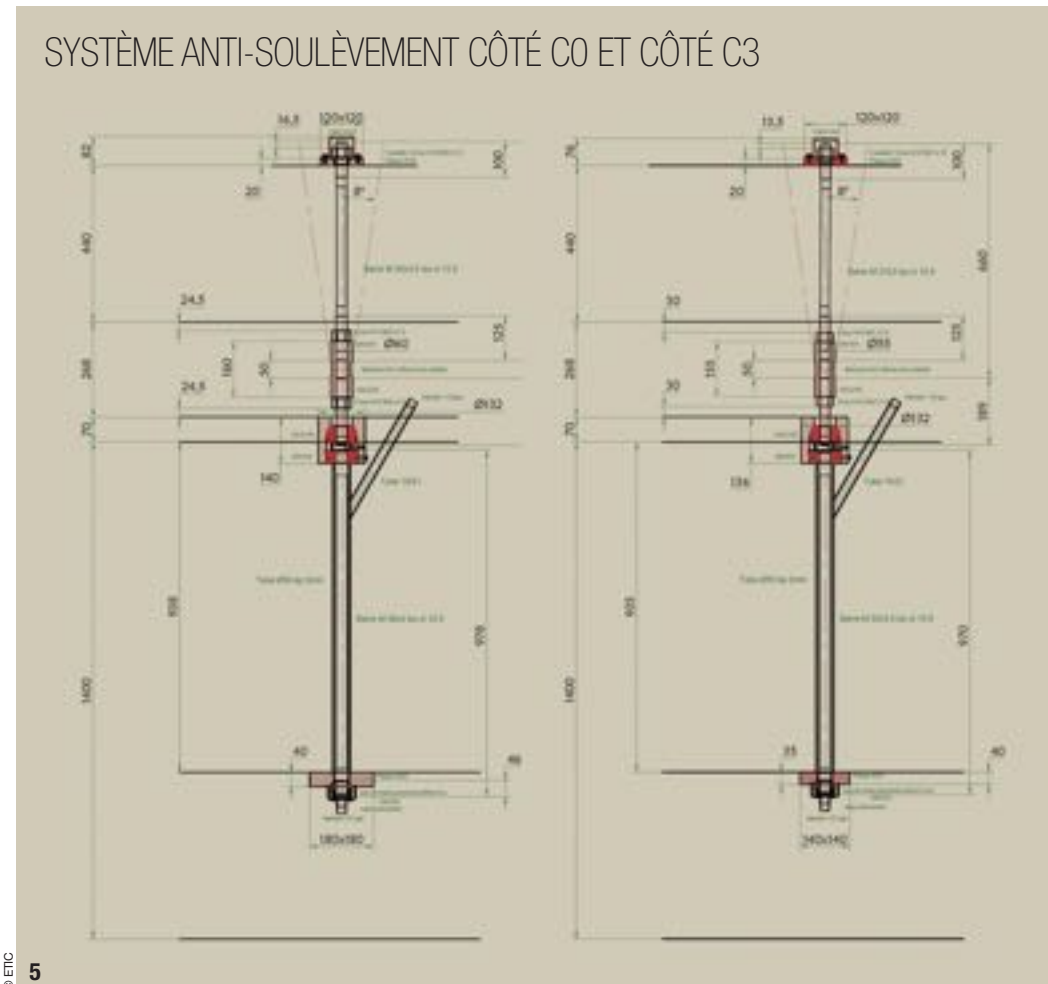
- Épaisseur totale du tablier inférieure à 1,05 m ;
- Flèche sous charge d'exploitation inférieure à 1/800^e de la portée ;
- Coefficient de majoration dynamique appliqué aux charges de tramway imposé à $\delta = 1,5$;
- Résistance au choc de poids lourd sur le tablier (50 t).

Ces contraintes ont conduit à mettre en place 6 poutres métalliques de 0,716 m de hauteur totale, avec un hourdis en béton de 30 cm d'épaisseur. Afin d'optimiser les quantités d'acier de charpente, il a été retenu des profilés PRS en lieu et place de profilés du commerce. Enfin, pour éviter les risques de déversement à la pose, c'est une section de caisson qui a été choisie (figure 4).

Le choix de suppression de l'appui en TPC aboutit à un balancement de travées très déséquilibré, avec des longueurs de 10,10 m - 37,72 m - 11,00 m, soit un balancement de l'ordre de 0,27.

Afin de recomprimer les appuis d'extrémités, il a été retenu le principe de dénivellation des appuis sur piles. Le guide Cerema « Ponts mixtes acier-béton - Guide de conception durable » limite à $\sigma_e/4$ l'effet non pondéré des

SYSTÈME ANTI-SOULÈVEMENT CÔTÉ C0 ET CÔTÉ C3



© ETIC 5

dénivellations sur la charpente, σ_e étant la limite élastique de l'acier dans la section considérée. Pour cet ouvrage, et s'agissant d'un acier de type S355, cela correspond à une dénivellation de l'ordre de 20 cm.

Cette dénivellation est suffisante pour éviter des soulèvements d'appui sur culée à l'ELS quasi-permanent, mais compte tenu du poids important de la dalle tramway et du coefficient de majoration dynamique affectant la charge roulante, elle n'est pas suffisante en ELS caractéristique et à l'ELU.

5- Système anti-soulèvement côté C0 et côté C3.

6- Disposition des barres anti-soulèvement.

5- Hold-down system at C0 end and C3 end.

6- Detailing of hold-down bars.

Il a donc fallu recourir à l'utilisation d'un système anti-soulèvement.

Le choix s'est porté sur le système « Anti-uplift » mis au point par la société Etic et mis en œuvre précédemment par Eiffage sur la passerelle du Paillon à Nice, le pont de Kamoro à Madagascar et le viaduc de la Savoureuse (LGV Rhin-Rhône).

Le système se compose en partie supérieure d'une barre de précontrainte à haute limite élastique et très haute ductilité, bi-articulée à ses extrémités afin de permettre la libre dilatation du tablier

(angle d'inclinaison admissible jusqu'à 7°) (figure 5).

Chaque barre est composée de deux éléments : l'un est relié au tablier (en l'occurrence la semelle supérieure de l'entretoise sur culée) et l'autre est une barre ancrée dans le sommet de culée au moyen d'une plaque d'ancrage.

Ces deux éléments sont reliés entre eux par un manchon qui permet à la fois la mise en tension de la barre (pour éviter les battements sur les appareils d'appui en situation de service) et le débrayage du système afin de permettre le vérinage du tablier et le remplacement des appareils d'appui en élastomère fretté. On met en place un total de 7 barres sur chaque culée (figure 6).

La tension initiale des barres est obtenue par serrage du manchon à l'aide d'une clé dynamométrique.

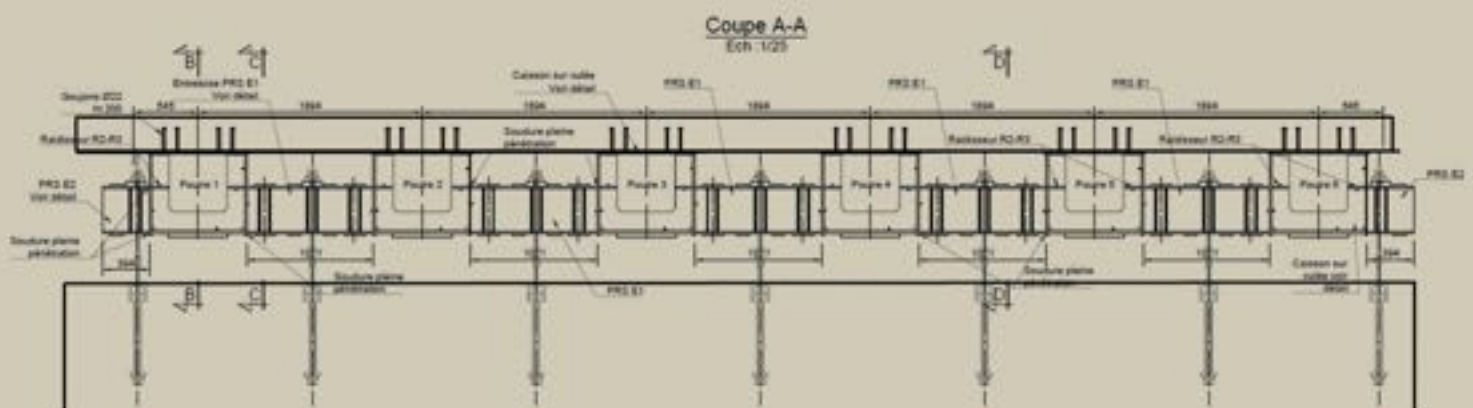
Cette variante a été retenue par la maîtrise d'ouvrage sur la recommandation de la maîtrise d'œuvre, après validation des services d'exploitation, car la suppression des travaux en TPC permet :

- D'améliorer la sécurité du chantier ;
- De diminuer la gêne aux usagers de la rocade (le nombre de jours de neutralisation de voie passe de 68 à 10) ;
- De diminuer sensiblement la durée des travaux sur site, qui passe de 61 à 31 semaines, en évitant notamment le dévoiement des réseaux.

En outre, l'absence de pile en TPC et l'utilisation d'acier autopatinable pour la charpente permet de limiter les coûts de maintenance et leur impact sur le trafic de la rocade.

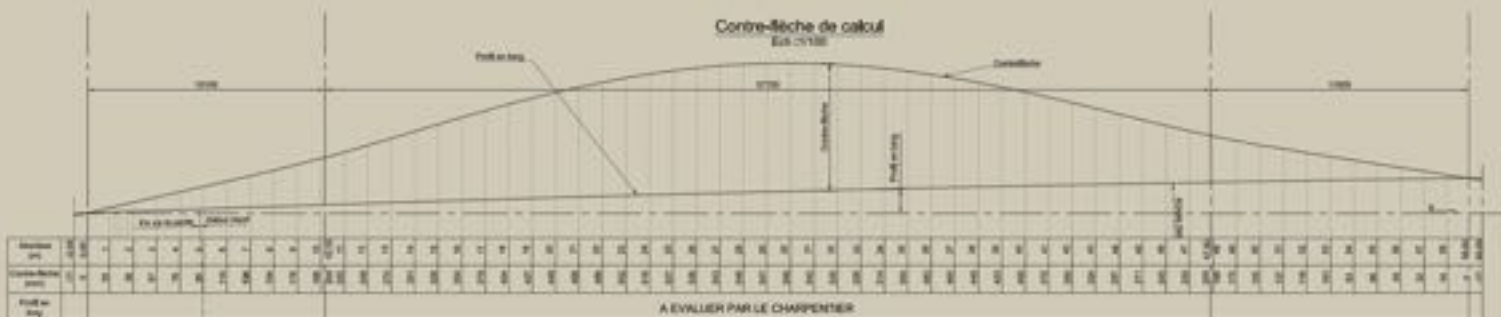
Enfin, ces avantages sont obtenus pour un coût de construction légèrement inférieur à celui de la solution de base. ▷

DISPOSITION DES BARRES ANTI-SOULÈVEMENT



6
© EIFFAGE

CONTREFLÈCHE DE FABRICATION DES POUTRES MÉTALLIQUES



7

© EIFFAGE

LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

Le dimensionnement du tablier a été réalisé à partir d'une modélisation poutre-échelle avec le logiciel ST1. Pour le hourdis béton, les zones fissurées ont été déterminées à partir d'une première analyse globale non fissurée. Ce modèle prend en compte le phasage de construction :

- Mise en place des poutres à la grue, les appuis sur piles étant calés à 20 cm au-dessus du niveau définitif, puis réalisation des entretoises sur appui ;
 - Mise en place des barres anti-soulèvement ;
 - Pose des prédalles, puis bétonnage de la partie coulée en place ;
 - Dénivellation de 20 cm sur piles ;
 - Mise en tension des barres anti-soulèvement ;
 - Réalisation des superstructures.
- Cela permet de modéliser les effets du retrait et du fluage.

Par ailleurs, les effets de la dénivellation d'appui dépendant de la rigidité du hourdis, il était nécessaire d'avoir la bonne rigidité du hourdis lors de l'application de la dénivellation d'appui afin de modéliser le plus réalistement possible les effets de cette dénivellation.

La contre-flèche a été évaluée pour être toujours positive sous application des actions permanentes et de la moitié des charges d'exploitation. Étant donnée la dénivellation d'appui de 20 cm, la contre-flèche imposée aux poutres métalliques est importante : elle est de forme parabolique avec une valeur au sommet en travée centrale de 53 cm (figure 7).

Les poutres métalliques ont été également vérifiées en phase provisoire, en particulier vis-à-vis du déversement lors des phases de grutage, et de bétonnage du hourdis. Pour limiter les phases de coupure de la rocade,

la préfabrication a été privilégiée pour la réalisation du hourdis. La solution de prédalles a été retenue car les éléments à lever étaient plus légers et on s'affranchissait ainsi des problématiques que posaient la solution dalles pleines préfabriquées : la solution prédalles permettait de poser les éléments plus rapidement et de limiter les interventions au-dessus de la rocade.

La tension finale des barres anti-soulèvement a été déterminée pour recomprimer les appuis sur culées aux ELS caractéristiques.

La tension initiale des barres a été fixée en tenant compte des différentes pertes de façon à obtenir la tension finale souhaitée.

Le couple de serrage pour précontraindre les barres a été calculé conformément à la norme NF E25-030.

Aux ELU, les barres travaillant en passif, il a été vérifié que les surtensions dans les barres étaient admissibles.

7- Contreflèche de fabrication des poutres métalliques.

8- Tablier après pose des prédalles.

7- Steel beam production camber.

8- Deck after placing precast slabs.

LE DÉROULEMENT DES TRAVAUX

LES APPUIS

Les travaux ont débuté par la mise en place de la signalisation provisoire sur l'A630 (réduction des largeurs de voies, mise en place de séparateurs

modulaires de voies, etc.) permettant de libérer les emprises nécessaires à la réalisation des appuis en rive.

Une campagne de reconnaissance géotechnique exhaustive (1 essai au droit de chaque pieu) a ensuite été lancée du fait du risque de vide karstique identifié dès les études géotechniques initiales. Ces essais ont permis de confirmer la présence de vides karstiques remplis ayant pour conséquence :

- La réalisation de pieux par mise en œuvre de tubes louvoyés et laissés en place ;
- L'augmentation de près de 40% de la profondeur des pieux.

Du fait de l'approfondissement des pieux et de la relative proximité entre la pile et la culée (travées de 10 et 11 m environ), des aménagements type soutènements provisoires ont dû être réalisés entre les piles et les culées de manière à permettre l'évolution d'une foreuse adaptée.



8

© EIFFAGE

Les élévations des appuis se sont alors poursuivies en intégrant aux chevêtres de culées la partie inférieure des barres anti-soulèvement.

LE TABLIER

Les poutres caissons sont arrivées par convoi exceptionnel depuis l'usine de l'entreprise Berthold située à Dieue-sur-Meuse, par tronçons de 30 m environ. Les deux tronçons constituant le caisson définitif ont alors été soudés sur place avant d'être grutés lors d'une nuit de coupure totale de l'A630 (de 21 h à 05 h) au moyen d'une grue de 700 t située sur le bord de l'A630 afin de pouvoir être équipée préalablement à l'opération de pose. Chaque poutre pèse environ 35 t et a dû être envoyée à une distance de 28 m (figure 1).

Au vu de l'élançement exceptionnel de ces caissons, des vérifications en phase provisoire ont été menées par le Biep afin d'estimer la flèche en phase de grutage des caissons puis dans un deuxième temps la conformité des flèches résiduelles pour chaque phase de chargement (pose des prédalles, bétonnage du hourdis, ...). À titre d'exemple une flèche de plus de 30 cm a été mesurée en phase de levage.

Ces vérifications sont particulièrement importantes au vu des contraintes sur la géométrie de l'intrados du tablier eu égard au gabarit autoroutier et sur l'extrados (fil rouge du profil en long du tramway avec peu de tolérances).

Les entretoises sur appuis ont ensuite été soudées avant de poser les prédalles collaborantes de 0,10 m d'épaisseur et 6 m de longueur, posées entre les caissons.

Ces prédalles ont été posées de nuit sous coupure d'un sens de circulation de l'A630 à l'aide d'une grue 50 t.

Une attention particulière a été portée sur l'étanchéité au droit des jonctions entre prédalles et au droit des jonctions entre les prédalles et les caissons afin



9 © EIFFAGE

9- Barre anti-soulèvement sur culée.

9- Hold-down bar on abutment.

d'éviter au maximum les fuites de laitance.

Du reste, les prédalles de rive ont été conçues avec des relevés définitifs permettant le coffrage à la fois du hourdis et des superstructures (contre-corniches) tout en permettant la mise en œuvre de garde-corps provisoires afin de limiter au maximum les interventions par l'extérieur de l'ouvrage

pouvant impacter les usagers de l'A630 (figure 8). En effet, le bétonnage du hourdis du tablier a été exécuté de jour sans coupure de la circulation.

Au final, sans tenir compte de la pose des équipements (corniches et garde-corps), la réalisation du tablier a nécessité seulement trois coupures de circulation de la rocade (1 coupure totale pour la pose des poutres et 2 coupures partielles par sens de circulation pour la pose des prédalles) réduisant considérablement la gêne pour les usagers de l'A630.

Les opérations de réalisation des superstructures se sont poursuivies de manière concomitante à la mise sur appui du tablier marquée par les opérations suivantes :

- Dénivellation de 0,20 m du tablier sur pile par dévérinage ;
- Dépose des appuis provisoires et mise en place des appuis définitifs en élastomère ;
- Mise en précontrainte des barres anti-soulèvement (figure 9) sur culées. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

ACIER DE STRUCTURE : 230 t d'acier autopatinable

BÉTON ARMÉ DU TABLIER : 214 m³

BÉTON ARMÉ DES APPUIS : 270 m³

PIEUX Ø 1 000 mm : 325 m sur 14 pieux

COÛT TRAVAUX OUVRAGE DE FRANCHISSEMENT DE LA ROCADE : 2,5 millions d'€ HT

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Bordeaux Métropole

MAÎTRE D'ŒUVRE : Artelia (groupement Tisya) - Agence BIp (architectes)

ENTREPRISES : Eiffage Gc (titulaire) - Biep (études) - Berthold (charpente métallique) - Etic (barres anti-soulèvement)

ABSTRACT

EXTENSION OF BORDEAUX TRAMWAY LINE C - RING ROAD OVERPASS

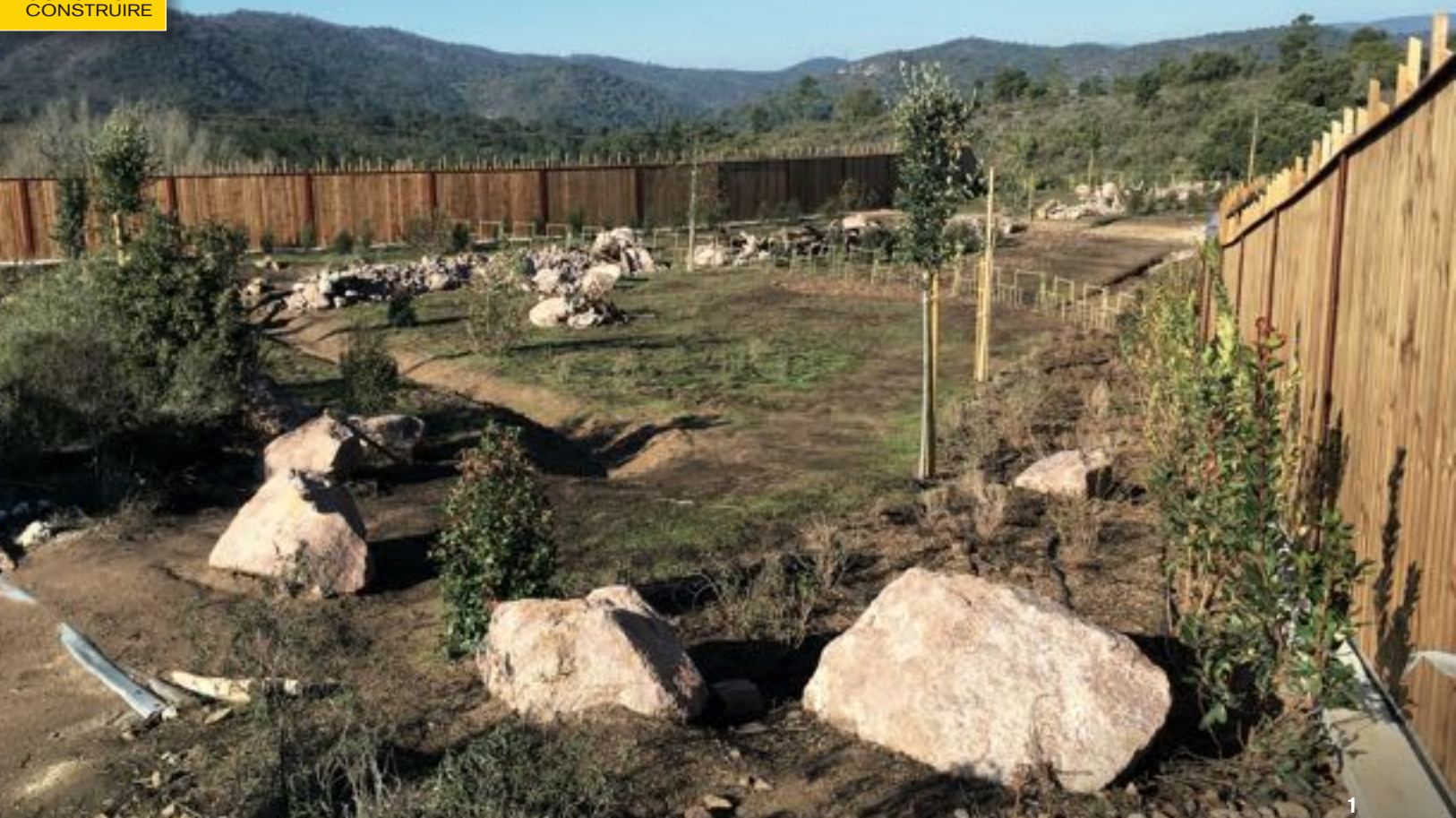
THOMAS CHAVIGNIER, ARTELIA - LOÏC PEDEZERT, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - LUDOVIC PICARD, EIFFAGE/BIEP - JONATHAN STAMP, EIFFAGE/BIEP

The new ring road overpass built for the extension of Line C of the Bordeaux Métropole tramway was designed without a support on the ring road's central reserve so as to limit the impact on traffic. It is a composite multiple-beam type deck comprising three spans of length about 11-37-11 metres. It makes use of unconventional techniques, in particular a major difference between the level of supports, and hold-down systems on abutments. □

AMPLIACIÓN DE LA LÍNEA C DEL TRANVÍA DE BURDEOS - CRUCE DE LA RONDA

THOMAS CHAVIGNIER, ARTELIA - LOÏC PEDEZERT, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - LUDOVIC PICARD, EIFFAGE/BIEP - JONATHAN STAMP, EIFFAGE/BIEP

La nueva obra que cruza la ronda, construida para la ampliación de la Línea C del tranvía del área metropolitana de Burdeos, se ha diseñado sin apoyo en el terraplén central de la ronda para limitar el impacto en el tráfico. Se trata de un tablero de tipo multi-vigas mixtas, formado por tres luces de unos 11, 37 y 11 m de longitud. Se han empleado técnicas poco habituales, en especial un desnivel de apoyos de gran amplitud y dispositivos anti-elevación de los estribos. □



© CAMPENON BERNARD TP

CONCEPTION-RÉALISATION DE L'ÉCOPONT DES ADRETS-DE-L'ESTÉREL SUR L'AUTOROUTE A8

AUTEURS : ROMAIN FABRE, INGÉNIEUR TRAVAUX, CAMPENON BERNARD TP COTE D'AZUR - JÉRÔME GUILPIN, INGÉNIEUR TRAVAUX, MATIÈRE SA - CLAUDE LE QUÉRÉ, RESPONSABLE EGIS JMI PARIS, EGIS STRUCTURES ET ENVIRONNEMENT - FRÉDÉRIC MENUËL, DIRECTEUR ADJOINT EGIS JMI, EGIS STRUCTURES ET ENVIRONNEMENT - JEAN-LOUIS MALFERE, CHEF DE PROJET ENVIRONNEMENT, EGIS STRUCTURES ET ENVIRONNEMENT

DANS LE CADRE DU PAQUET VERT AUTOROUTIER, UN CONCOURS DE CONCEPTION-RÉALISATION A ÉTÉ LANCÉ EN 2015 POUR LA RÉALISATION D'UN PASSAGE FAUNE AU-DESSUS DE L'A8 AUX ADRETS-DE-L'ESTÉREL. L'OUVRAGE EST UN DOUBLE-VOÛTE EN BÉTON ARMÉ PRÉFABRIQUÉ FONDÉ SUPERFICIELLEMENT SUR LE SUBSTRATUM ROCHEUX. LES ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS ONT ÉTÉ POSÉS À LA GRUE SOUS COUPURE DE NUIT. LA VOÛTE A ÉTÉ COUVERTE AVEC 60 cm DE REMBLAI EN TÊTE DE VOÛTE ET ÉQUIPÉE D'ÉCRANS LATÉRAUX EN BOIS. L'OUVRAGE FAIT L'OBJET D'AMÉNAGEMENTS ÉCOLOGIQUES IMPORTANTS ET D'UN SUIVI AU LONG COURS.

CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'OUVRAGE

Dans le cadre d'avenants à son contrat de concession, la société Escota a mis en œuvre un « Paquet Vert Autoroutier », constitué d'une série d'opérations améliorant les conditions environnementales.

Parmi ces opérations, figure la construction de plusieurs écoponts qui

permettent à la faune sauvage de traverser l'autoroute en toute sécurité par des ouvrages adaptés. Deux premiers ouvrages ont été construits : sur l'A57 à Pignans et sur l'A8 à Brignoles. En 2013, une étude a permis de définir quatre nouveaux emplacements intéressants sur le plan environnemental : dans le Var sur l'A8 à Pourcieux, aux Adrets-de-l'Estérel et à Vidauban, enfin,

**1- Vue globale
des aménagements.**

**1- Overall view
of the project.**

dans les Bouches-du-Rhône sur l'A57 à Fuveau.

Les réflexions sur le positionnement de ces ouvrages ont été menées en tenant compte des études réalisées sur la perméabilité du réseau Escota, des démarches relatives aux trames vertes et bleues et du futur schéma régional de cohérence écologique. Les contraintes foncières, d'aménage-



© EGIS
2

ment du territoire et environnementales de chaque site ont été également prises en compte. Ces quatre ouvrages écologiques ont fait l'objet d'un concours de conception-réalisation en 2015 (figure 2). Le présent article détaille la conception et la réalisation de l'écopont des Adrets-de-l'Estérel entre 2015 et 2018.

- 2- **Photomontage du concours.**
- 3- **Situation géographique de l'écopont.**
- 2- **Photomontage of the design contest.**
- 3- **Geographic location of the eco-bridge.**

Cet ouvrage vise plus particulièrement à recréer une continuité entre les massifs de l'Estérel (figure 3) pour l'ensemble de la petite et grande faune présente régulièrement ou susceptible de transiter dans le secteur (cerf élaphe, chevreuil, sanglier, renard roux, lièvre, chiroptères, amphibiens, reptiles, ...).

LA CONCEPTION DE L'OUVRAGE

LA CONCEPTION TECHNIQUE

La structure

L'ouvrage des Adrets est une double-voûte en béton armé préfabriquée parfaitement symétrique. Les voûtes d'ouverture 17,50 m sont articulées sur leurs piédroits qui reposent sur des semelles filantes.

L'ouvrage est constitué de 16 modules préfabriqués de 2,49 m. Chaque anneau est composé :

- D'un piédroit central commun aux deux voûtes de 50 cm d'épaisseur ;
- De deux piédroits latéraux de 35 cm d'épaisseur minimale ;
- D'une voûte mince de 20 cm à deux nervures dont la largeur varie entre 42 cm à leur naissance et 32 cm en fin de retombée.

La hauteur maximale de la voûte, nervures comprises, s'élève à 1,20 m à la clef. La hauteur libre ainsi dégagée respecte la contrainte de 4,85 m imposée par le programme. Les voûtes sont articulées sur les piédroits ce qui permet leur pose séparée rapide.

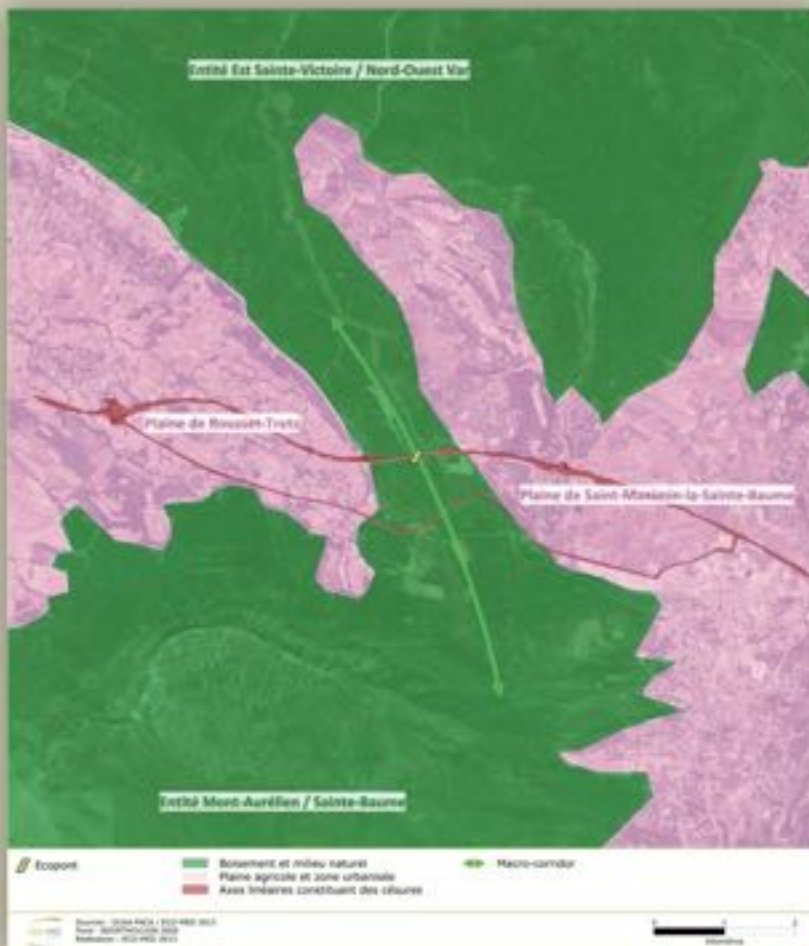
D'autres éléments préfabriqués à fonction de soutènement et appelés « têtes biaisées » viennent compléter la double-voûte aux entrées et sorties d'ouvrage, en accompagnant la pente du remblai sur les côtés. Ces éléments épousent la forme courbe des piédroits latéraux et leur hauteur décroît en fonction des niveaux du remblai arrière.

Un éclaté de l'ouvrage permet de visualiser l'ensemble de ces éléments (figure 5). Les plans de l'ouvrage ont tous été tirés d'une modélisation 3D sous Inventor®.

La préfabrication de l'ensemble revêt un double avantage :

- Une pose des éléments très rapide, avec un temps de travail sur chantier très limité répondant tout à fait aux contraintes de l'autoroute en service ;

SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE L'ÉCOPONT



© ECO-MED
3



4 © EGIS

→ Des qualités de parements très satisfaisantes et des éléments plus élancés, ce qui est appréciable d'un point de vue esthétique.

Enfin du point de vue de la durabilité, l'enrobage des armatures est aussi mieux maîtrisé ainsi que les conditions de bétonnage.

La finesse de la voûte est permise par l'usage des nervures dont l'espacement est proche de 1,25 m.

Une fois construites, les double-voûtes sont ensuite remblayées. Cet ouvrage s'adapte particulièrement à sa fonction de passage faune puisque, une fois

remblayé, il donne l'impression d'avoir été creusé dans un massif naturel et s'intègre bien à son environnement (figure 4).

La géotechnique et les principes de fondation

Globalement, le site des Adrets dispose d'un sol de bonne qualité pour constituer l'assise des fondations de l'ouvrage. Les reconnaissances ont mis en évidence la présence d'un horizon

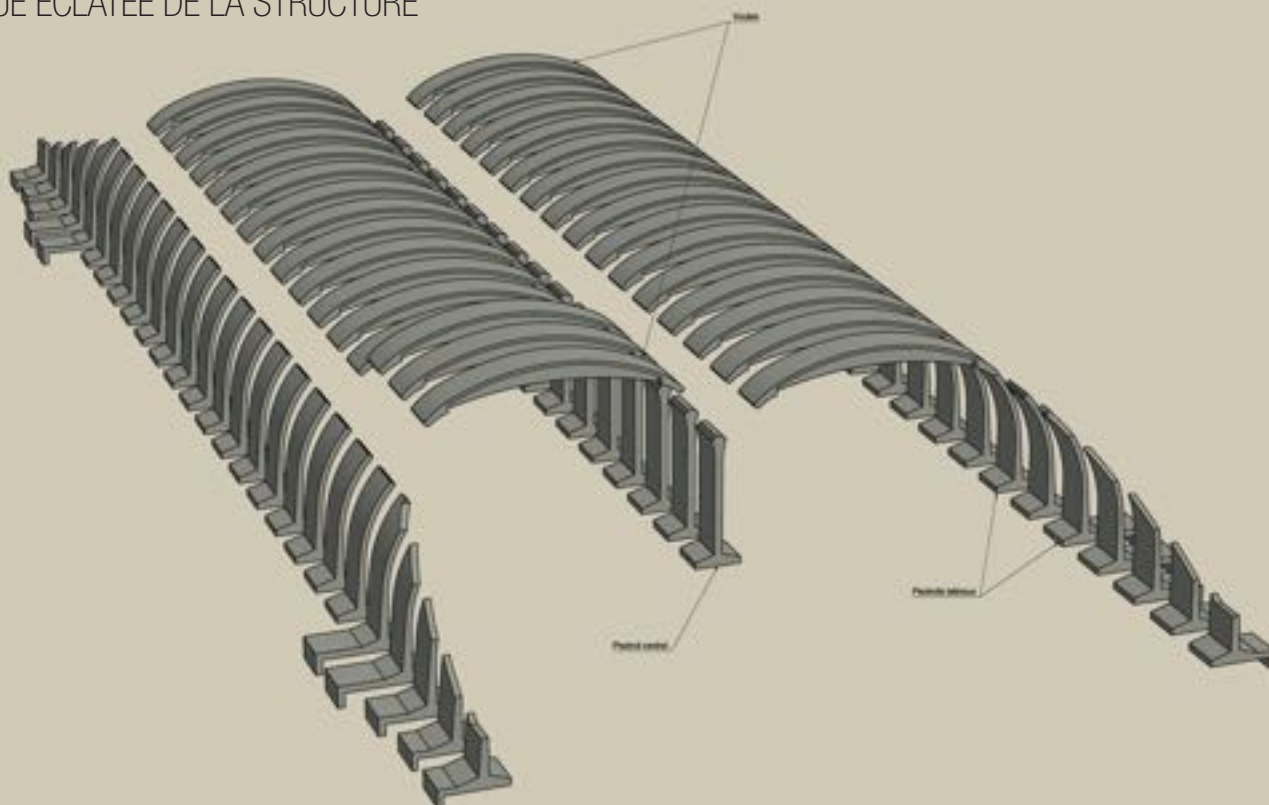
de grave limoneuse ou d'argiles schisteuses reposant sur le substratum de grès et schistes gréseux. Le niveau de fondation est donc recherché au toit du substratum sous les horizons de remblais rapportés. En rive Nord, le toit du substratum est altéré et décomposé mais les caractéristiques mécaniques restent assez élevées, augmentant vers 3 m d'épaisseur. Au centre et en rive Sud, le substratum rocheux est atteint directement à 2 m ou 2,50 m de profondeur sous le remblai.

Les principes de fondation suivants ont donc été retenus :

4- Vue 3D de la structure.
5- Vue éclatée de la structure.

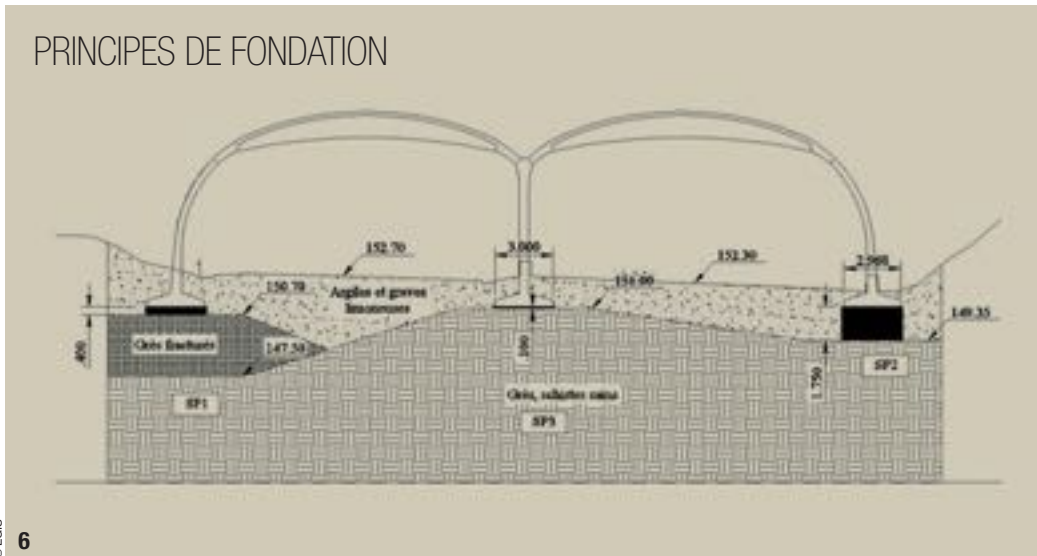
4- 3D view of the structure.
5- Exploded view of the structure.

VUE ÉCLATÉE DE LA STRUCTURE



5 © EGIS

PRINCIPES DE FONDATION



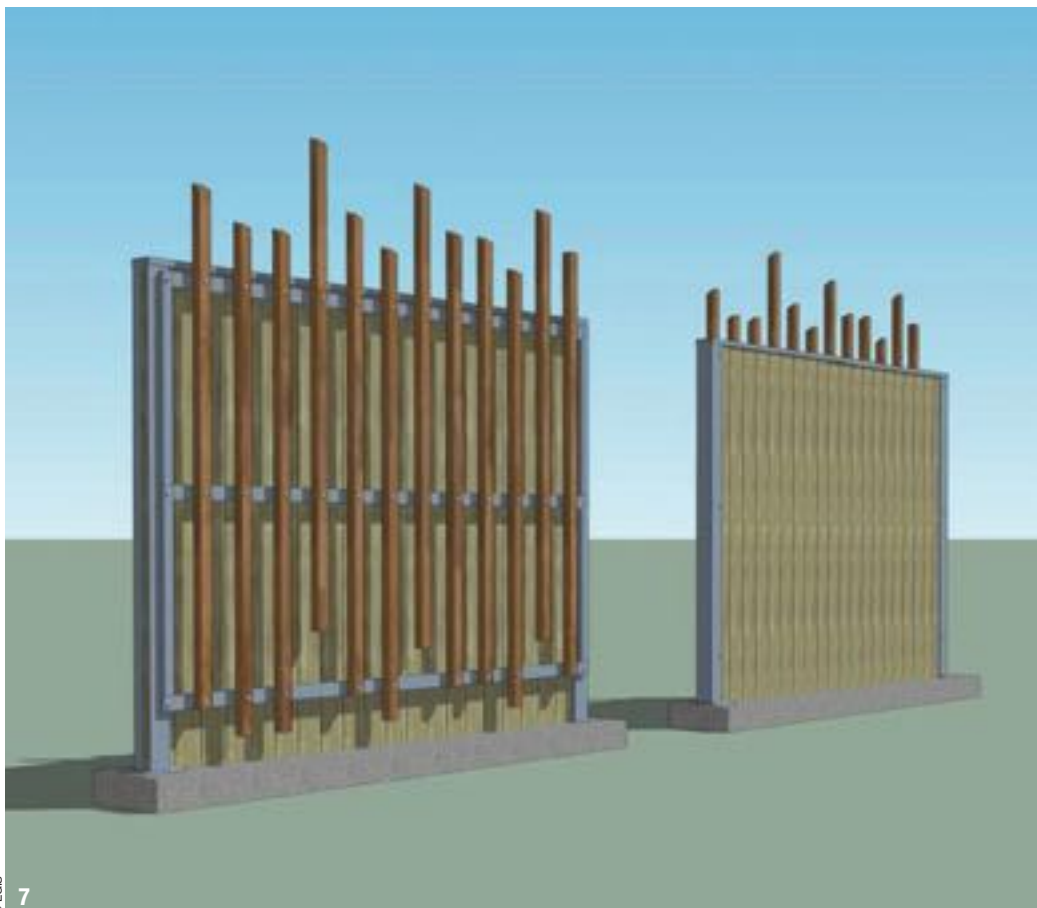
© EGIS
6

- Terrassement jusqu'au toit des grès altérés avec 0,20 m d'encastrement en rive Nord ;
 - Terrassement, sous les graves limoneuses pour atteindre le grès rocheux pour le piédroit central ;
 - Terrassement à 149,30 m NGF en rive Sud pour atteindre le substratum.
- Une assise de gros béton permet d'adapter le niveau des terrassements

6- Principes de fondation.
7- Structure des écrans de protection.

6- Fondation techniques.
7- Structure of protective shields.

sachant que les fonds de fouille sont fonction du niveau du grès peu altéré rocheux reconnu à l'ouverture de la fouille. L'assise de gros béton permet de remonter le niveau des semelles et d'adopter un niveau unique horizontal aux trois appuis pour en faciliter la pré-fabrication (figure 6). Les semelles filantes de la double-voûte ont une largeur d'environ 3 m sur la partie courante.



© EGIS
7

En revanche les ouvrages de soutènement aux extrémités des voûtes sont pourvus de semelles plus larges pour assurer leur stabilité. En effet, les têtes biaises n'étant pas équilibrées par la butée de la voûte dans leur fonction de soutènement, leurs semelles compensent ce manque.

Aussi les extensions de semelles sont d'épaisseur constante et constituent les seules parties de la structure coulée en place avec leur bèche éventuelle. Ces extensions s'opèrent toujours par l'arrière (côté terres) afin d'éviter les travaux de déblais et de coulage sur l'emprise de la chaussée de l'auto-route.

Les largeurs de semelles pour les murs les plus hauts (proches des voûtes) atteignent 5,50 m.

La couverture et l'assainissement

Sur les voûtes de l'ouvrage, sont disposées successivement les couches suivantes :

- Le complexe d'étanchéité avec sa protection constitué d'un géotextile d'indépendance, d'une membrane bitumineuse et d'un géotextile de protection ;
- 80 cm au minimum de matériau de remblai et de terre végétale ;
- À l'entre-voûte, 30 cm d'épaisseur de matériau drainant avec un drain central.

Le complexe d'étanchéité des voûtes est arrêté au niveau des articulations avec les piédroits. C'est ensuite une nappe drainante qui est positionnée afin d'éviter toute stagnation d'eau à l'arrière des piédroits et de limiter ainsi la poussée sur l'ouvrage.

La couverture du tablier est ensuite modelée de manière à recréer une surface qui paraisse la plus naturelle possible en rétablissant les talus de part et d'autre de la voie franchie.

Sous cette couverture de terre, le système d'assainissement de l'ouvrage doit permettre d'évacuer :

- Les eaux infiltrées dans le remblai sur ouvrage ;
- Les eaux ruisselant directement sur la partie des voûtes à nu ;
- Une partie des eaux infiltrées dans les remblais latéraux.

L'évacuation générale des eaux infiltrées dans le remblai sur ouvrage se fait par le biais de la pente longitudinale de 2,13% imposée par la topographie de la zone. Les eaux d'infiltration sont drainées et acheminées au point bas par le matériau drainant sous-jacent au remblai, et disposé sur le complexe d'étanchéité.

Au point bas de l'ouvrage, une descente d'eau de 180 mm de diamètre intérieur et intégrée dans le piédroit central permet d'acheminer les eaux vers le caniveau du TPC.

La récupération des eaux ruisselant sur les voûtes vers les rives de l'ouvrage et des eaux infiltrées dans les remblais latéraux est assurée par un drain longitudinal de 160 mm de diamètre intérieur disposé en pied de piédroit côté remblai, au-dessus du niveau des semelles. Ce drain est donc destiné à récupérer les eaux sur toute la longueur de l'ouvrage, y compris au niveau des soutènements aux extrémités.

Le colmatage des joints au niveau des rotules est assuré par un cordon de mastic recouvert d'une bande équerre de 25 cm de large.

Les drains longitudinaux rejettent ensuite les eaux dans le réseau d'assainissement de l'autoroute en extrémité d'ouvrage.

Les écrans

Les écrans de protection sont constitués de panneaux entre 3 m et 4 m de long constitués de planches emboîtables de 20 cm de large insérées verticalement entre des profilés métalliques (type HEA). L'ensemble de l'écran de 2,5 m de haut repose sur des longrines en béton gris lisse permettant également le soutènement de la terre végétale. Une couverture assure au sommet de l'écran une protection de la tranche des planches.

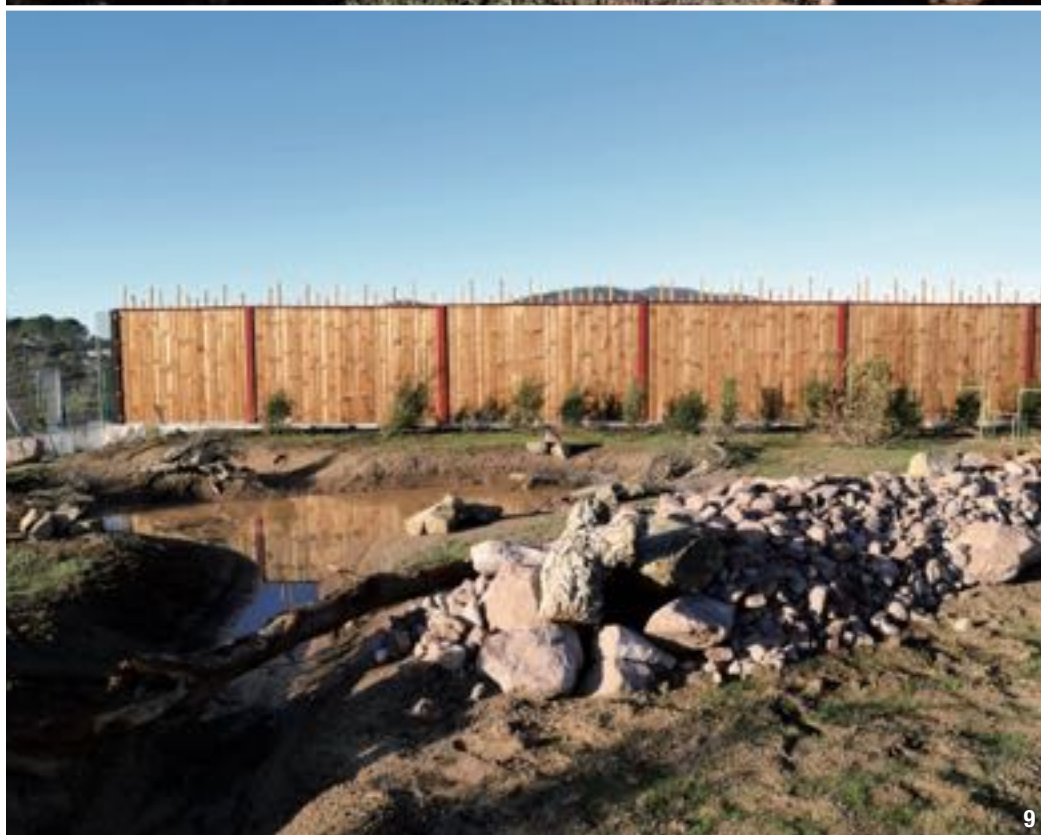
La fonction des panneaux assure une protection visuelle et sonore pour favoriser le passage de la faune en toute quiétude. Ces éléments viennent en complément des aménagements paysagers et écologiques. Leur implantation vient épouser les formes en plan du diabolos du passage faune.

Les écrans se raccordent au niveau des clôtures grillagées existantes avec un recouvrement de plusieurs mètres afin d'assurer une impossibilité de franchissement vers les voies de circulation. La face extérieure de l'écran est habillée en surépaisseur par des tasseaux de bois (2 m à 2,5 m de haut) espacés d'une quinzaine de centimètres, positionnés verticalement sur un cadre en métal, lui-même fixé sur les poteaux. Ils seront décollés de la paroi de l'écran d'une quinzaine de centimètres (figure 7). Côté passage faune, la structure de l'écran est lisse. L'ensemble des éléments en bois sont de classe 4 ayant le label PEFC (label écologique certifiant que le bois provient de forêts gérées de façon durable).



8

© EGIS



9

© EGIS

LA CONCEPTION ÉCOLOGIQUE

L'objectif est de permettre à la faune locale de disposer d'un espace attractif pour la traversée de l'A8. Des dispositifs ont donc été conçus pour un large panel d'espèces cibles terrestres, semi-aquatiques et avifaunistiques. L'ensemble a été disposé afin d'assurer l'intégration paysagère de l'ouvrage bordant le site classé des Adrets-de-l'Estérel.

Ces aménagements se traduisent par :
→ Le modelage de la couverture de la terre végétale. Il est volontairement

8 & 9- Aménagements écologiques.

8 & 9- Écologique améliorés.

irrégulier, favorisant la création de milieux humides temporaires. Les limites de la couverture végétale de l'ouvrage ont été conditionnées par la présence de la Canche de Provence (protégée) ;

→ Les plantations reprennent les caractéristiques du milieu naturel local de type « maquis bas ». Elles se caractérisent par un milieu ouvert enherbé (axe de déplacement pour la faune) par des haies, bosquets et plants arbustifs et arborés (gui-



10

© MATIERE

dage de la faune), et par une palette d'espèces végétales indigènes dont la floraison et la fructification s'échelonnent sur une grande partie de l'année ;

→ Deux points d'eau temporaires, alimentés par le ruissellement, ont été créés afin de favoriser les interconnexions et la traversée de l'ouvrage. La plantation de variétés persistantes aux abords limite le comblement par chute de feuilles, fournissent de l'ombrage et rendent chaque point d'eau attractif. Les

10- Pose des piédroits préfabriqués sous coupure de nuit.
11- Piédroit sur TPC.

10- Placing prefabricated columns during traffic break at night.
11- Column on central reserve.

berges et le fond ont été aménagés afin de résister aux fréquentations par certaines espèces (sangliers notamment) ;

→ Des andains d'aspect ruiniforme, constitués de pierres, de bois, et de briques agencées à l'intérieur de la structure, ont été mis en place sur la longueur de l'ouvrage, alternant entre formes linéaires et circulaires. L'implantation est désaxée pour maintenir un dégagement central ouvert aux déplacements. À chaque extrémité de l'écopont, l'ensemble

présente une terminaison « en patte d'oie », se raccordant au milieu naturel limitrophe, et orientant les déplacements de la petite faune ;

→ Des éléments caillouteux et rocheux isolés servent d'abris à la microfaune (mammifères, reptiles, insectes, batraciens, ...) et maintiennent une connexion avec les andains (figure 8) ;
 → La forme en diabolo évite tout stress à la grande faune (perspective rasante plus ouverte qu'un ouvrage linéaire) ;



11

© MATIERE



12

© MATIERE

→ L'ouvrage est bordé de chaque côté par des palissades en bois qui protègent du bruit et des lumières liés à la circulation sur l'autoroute (figure 9).

Enfin, des barrières anti-intrusion et des alignements rocheux ont été installés de part et d'autre de l'écopont, préservant la circulation animale sur l'ouvrage mais limitant la traversée de véhicules.

LA CONSTRUCTION DE L'OUVRAGE

L'ouvrage a été réalisé en quatre grandes parties :

→ **Terrassement des fondations :** afin de réaliser les fondations de l'ouvrage, un grand terrassement a été réalisé de part et d'autre de l'autoroute : des fouilles de 70 m de longueur par 7 m de largeur et entre 1,5 m et 6 m de profondeur.

→ **Pose de l'ouvrage :** Les éléments en béton ont été préfabriqués en usine et livrés au fur et à mesure. La pose de ces éléments s'est faite de nuit à la grue : les piédroits (figures 10 et 11) et les voûtes (figures 12 et 13).

→ **Remblaiement :** Une fois les voûtes en béton mises en œuvre, les remblais techniques ont été réalisés de part et d'autre de l'ouvrage. Sur une hauteur de 10 m environ, les terrassiers ont réalisé des couches compactées de 15 cm jusqu'à la rotule (lien

entre les piédroits et les voûtes). Puis l'étanchéité de l'ouvrage a été réalisée. Enfin les remblais ont repris jusqu'au sommet de l'ouvrage.

→ **Écrans bois :** À la fin du remblai, ont été réalisés les supports en béton des écrans en bois, en béton extrudé + cages d'armature, dans lesquels ont été scellés les poteaux des écrans en bois. Les écrans ont été posés par la suite.

12- Pose des voûtes sous coupure de nuit.

13- Vue de drone après pose des éléments de voûte.

12- Placing arches during traffic break at night.

13- Drone's view after placing arch members.

LE SUMI ÉCOLOGIQUE DE L'OUVRAGE

La performance écologique de l'ouvrage est évaluée en s'assurant de :

- La pérennité des plantations ;
- La bonne alimentation en eau des mares créées ;
- La fréquentation anthropique limitée ;
- La fréquentation faunistique des espèces identifiées dans le secteur avant travaux (figure 1 - vue globale des aménagements).



13

© MICHEL MARTINI



© CAMPENON BERNARD TP
14

Le suivi écologique est effectué pour l'ensemble du cortège faunistique (chiroptères, grands et petits mammifères terrestres, entomofaune, batraciens et reptiles, avifaune).

Dans un premier temps il est réalisé sur 24 mois, puis sera prolongé et éventuellement ciblé sur certaines espèces.

Pour effectuer ces suivis, le site est temporairement équipé par des dispositifs de suivi spécifiques (pièges à traces, à encre, et photographiques) (figure 14).

Le suivi des chiroptères est effectué par trajectographie 3D (Bat3Data®). □

14- Pièges à traces.

14- Animal track traps.

PRINCIPALES QUANTITÉS

VOLUME DE BÉTON DE SUBSTITUTION : 1 480 m³

VOLUME DE BÉTON VOÛTES : 1 500 m³

TONNAGE ARMATURES PASSIVES : 170 t

ÉTANCHÉITÉ : 1 400 m²

PIÈCES PRÉFABRIQUÉES : 104 dont 32 unités de 45 t et 72 de 27 t

VOLUME DE TERRASSEMENT : 4 238 m³

VOLUME DE REMBLAIS : 11 500 m³

ÉCRANS BOIS : 390 m²

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Escota

ASSISTANT AU MAÎTRE D'OUVRAGE : Tractebel Engineering

GROUPEMENT DE CONCEPTION-RÉALISATION

ENTREPRISE FONDATIONS ET TERRASSEMENTS :

Campenon Bernard Tp Côte d'Azur

ENTREPRISE VOÛTES : Matière SA

ENTREPRISE AMÉNAGEMENTS : Méditerranée Environnement

CONCEPTEUR TECHNIQUE : Egis Jmi

CONCEPTEUR ÉCOLOGIQUE : Egis Environnement

ABSTRACT

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE ADRETS-DE-L'ESTÉREL ECO-BRIDGE OVER THE A8 MOTORWAY

ROMAIN FABRE, CAMPENON BERNARD - JÉRÔME GUILPIN, MATIÈRE SA - CLAUDE LE QUÉRÉ, EGIS - FRÉDÉRIC MÉNUEL, EGIS - JEAN-LOUIS MALFERE, EGIS -

The construction of a motorway disturbs the habitat and the movements of fauna through the territory. *Eco-bridges are structures developed specifically to restore areas friendly to fauna and flora as naturally as possible. Eco-bridges are the result of constant structural improvements and also a deeper knowledge of ecological engineering. The Adrets-de-l'Estérel eco-bridge project began in January 2016 and the structure is currently being delivered. The bridge covers the three-lane dual-carriageway and hard shoulder of the motorway over a length of 40m. It is of the double-arch type so as to replicate as well as possible the hill that existed formerly before the creation of the A8. The structure consists of concrete parts prefabricated in factory and then placed by crane. This solution is also more discreet from the traffic viewpoint. The contract also includes ecological engineering and various landscaping assignments such as establishing the embankment, landscape contouring, planting and improvements.* □

DISEÑO-REALIZACIÓN DEL ECOPUENTE DE ADRETS-DE-L'ESTÉREL SOBRE LA AUTOPISTA A8

ROMAIN FABRE, CAMPENON BERNARD - JÉRÔME GUILPIN, MATIÈRE SA - CLAUDE LE QUÉRÉ, EGIS - FRÉDÉRIC MÉNUEL, EGIS - JEAN-LOUIS MALFERE, EGIS -

La implantación de una autopista perturba el hábitat y los desplazamientos de la fauna a través del territorio. *Los ecopuentes son construcciones habilitadas de forma específica para restaurar de la manera más natural posible espacios acogedores para la fauna y la flora. Los ecopuentes nacieron de la constante mejora de las estructuras, pero también de conocimientos cada vez más profundos en materia de ingeniería ecológica. La obra del ecopuente de Adrets-de-l'Estérel comenzaron en enero de 2016 y la obra está en fase de entrega. Incluye los tres carriles de doble sentido de la autopista, así como un carril de emergencia sobre una longitud de 40 m. Es de tipo doble bóveda para reformar lo mejor posible la antigua colina presente antes de la creación de la A8. La estructura está formada por piezas de hormigón prefabricadas en fábrica e instaladas mediante una grúa. Asimismo, esta solución es más discreta desde el punto de vista de la circulación. El contrato incluye también la ingeniería ecológica y las distintas misiones paisajísticas, con la instalación del terraplén, modelos paisajísticos, plantaciones y ordenaciones.* □



1

© ALAIN SPIELMANN

CONTOURNEMENT DE BEYNAC (24) - CONCEPTION DES DEUX OUVRAGES D'ART DE FRANCHISSEMENT DE LA DORDOGNE

AUTEURS : ALAIN SPIELMANN, ARCHITECTE - VINCENT PETIT, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SETEC TPI

LE PROJET DE CONTOURNEMENT ROUTIER DU VILLAGE DE BEYNAC-ET-CAZENAC, D'UNE LONGUEUR DE 3,2 km DANS UN MÉANDRE DE LA DORDOGNE, NÉCESSITE LE FRANCHISSEMENT, À DEUX REPRISES, DE LA RIVIÈRE PAR LA ROUTE DÉPARTEMENTALE N°703 RELIANT BERGERAC À SARLAT-SOULLAC. LES OUVRAGES D'ART DU PROJET S'INSCRIVENT DANS UN SITE NATUREL, PAYSAGER ET TOURISTIQUE REMARQUABLE, LE LONG DES PONTS FERROVIAIRES EXISTANTS DATANT DU 19^e SIÈCLE.

PRÉSENTATION DU PROJET DES JOYAUX NOUVEAUX EN DORDOGNE

Le projet de contournement de Beynac s'insère avec discrétion dans un paysage composé au fil des temps autour des boucles de la Dordogne. Conçu et imaginé dans son ensemble sur une distance de 3,2 km, la liaison entre la RD 703 et la RD 49 accompagne le paysage existant sans heurt et sans effet architectural, en venant,

tout en douceur, fondre et inscrire la nouvelle route à deux voies ainsi que la voie douce (piéton, cycles) dans ce territoire du triangle d'or périgourdin (figures 1 et 2).

Les deux ponts franchissant la Dordogne, dits Pont du Pech et Pont de Fayrac, présentent respectivement des longueurs totales de 211 m en 8 travées et 216 m en 9 travées, et sont de conceptions très similaires. Ils comportent des travures guidées par celles

des deux ponts SNCF existants situés à proximité.

Les ponts présentent chacun deux tabliers distincts pour isoler et sécuriser les circulations douces du trafic routier. Les tabliers métalliques routiers et les tabliers mixtes acier-béton des passerelles sont conçus les plus élancés possibles pour laisser voir les tympans et les arcs des ponts SNCF maçonnés. Les tabliers des passerelles sont équipés de belvédères créant des points

de vue permettant d'admirer le cadre environnemental et paysager du site. Afin que le projet s'intègre le plus discrètement possible dans le paysage de collines boisées, l'acier à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique (dit autopatinable) a été privilégié comme matériau de construction pour les tabliers. Les intrados de tous les tabliers sont courbes pour s'harmoniser, dialoguer avec les arcs des ponts SNCF et avoir des reflets arrondis dans



la Dordogne. Ils donnent ainsi l'impression de flotter, de danser d'une pile à l'autre sur les eaux.

Les piles de pont en béton, dissymétriques, type « piles-roseaux », ou « piles-arbres » en V, accentuent la transparence et permettent une vision intéressante sur les sous-faces des caissons de largeur variable donnant l'effet « de ventre de poisson ».

La conception architecturale du projet se conforme aux fortes contraintes de site et environnementales, en respecte les orientations de sobriété portées par les Monuments Historiques, tout en proposant des ouvrages d'art contemporains, dissymétriques et dessinés sur

1- Vue du pont du Pech.

2- Plan d'ensemble du projet de contournement comprenant les circulations douces.

1- View of Pech Bridge.

2- General layout of the bypass project including pedestrian and cyclist traffic.

mesure, qui mettent en valeur tout le site de la vallée de la Dordogne.

HISTORIQUE

Le contournement routier du village de Beynac, classé parmi les plus beaux villages de France, est un projet porté par le Service du Patrimoine Routier du Département de la Dordogne.

En 2005, un premier concours avait déjà été lancé et remporté par une équipe de maîtrise d'œuvre qui comprenait notamment Alain Spielmann Architecte. Par la suite, ce concours fut interrompu. En 2015, un nouveau concours anonyme de maîtrise d'œuvre a été lancé le Conseil Départemental de

la Dordogne. En janvier 2016, le groupement Setec tpi (mandataire), Alain Spielmann Architecte, Samuel Craquelin Paysagiste a été déclaré lauréat.

La phase conception de la mission de maîtrise d'œuvre complète (comprenant les éléments de mission AVP, PRO et ACT) s'est déroulée de début 2016 à fin 2017. Elle comportait, outre la conception technique, architecturale et paysagère du projet, l'établissement de l'ensemble des dossiers réglementaires environnementaux IOTA ("Installations, Ouvrages, Travaux et Aménagements" soumis à la loi sur l'eau).

CONCEPTION DES OUVRAGES

Les ouvrages d'art du Pech et de Fayrac sont implantés en amont des ponts SNCF existants (figure 3) et comportent des piles de faible largeur, alignées avec les axes des piles des ponts ferroviaires.

Cet alignement répond au double objectif d'assurer une intégration presque transparente des nouveaux ouvrages face aux ponts ferroviaires, et de ne pas créer de barrage vis-à-vis de l'écoulement des eaux de la Dordogne (figure 4). Les études hydrauliques menées dans le cadre de la mission de maîtrise d'œuvre ont montré que le nouveau projet ne rehaussait la ligne d'eau de la rivière que de 2 à 4 cm environ en période de crue centennale en amont des ouvrages. L'impact hydraulique du projet est ainsi très limité.

Cette recherche de transparence a orienté la distribution des travures des ponts, similaires à celle des ponts ferroviaires, soit des travées relativement petites de 27,25 m maximum. ▷



© ALAIN SPIELMANN

2



3
© ALAIN SPIELMANN

De plus, grâce au choix du matériau acier pour les tabliers, il a été possible de proposer des tabliers très fins, dégageant les tympans des ouvrages existants en les positionnant au-dessus des clés des arcs maçonnés.

Distribution des travées des ouvrages :
→ Pont du Pech : 22,0 m - 6x27,25 m - 26,0 m (figure 5) ;
→ Pont de Fayrac : 17,8 m - 23,33 m - 5x27,25 m - 23,33 m - 16,17 m.

TABLIERS MÉTALLIQUES ET MIXTES ACIER-BÉTON

Géométrie

La conception des tabliers routiers et des passerelles s'est portée sur des caissons métalliques de hauteurs variables, la courbure de l'intrados faisant ainsi écho à celle des arcs des ponts SNCF. Les rayons des arcs des caissons sont constants pour chaque tablier et chaque travée d'un même ouvrage.

Les tabliers des ouvrages sont en alignement droit en plan, parallèles l'un par rapport à l'autre, et présentent, en profils en long, une courbure différente suivant les ouvrages (rayon de 6 000 à 10 000 m).

Les tabliers routiers sont de type caisson axial métallique à dalle orthotrope à raidisseurs par augets et pièces de ponts en encorbellement. La hauteur totale des caissons varie de 1,60 m sur appuis à 0,90 m à la clé (figure 6). La semelle inférieure des caissons est de largeur variable, de 2,64 m sur

appuis à 2,92 m à la clé. En profil en travers, la largeur de charpente métallique est constante : 8,20 m hors corniche, y compris longrines, pour 6,60 m de largeur utile de circulation routière (2x1 voies).

Les tabliers des passerelles sont de type mixte acier-béton (caissons ouverts à pièces de ponts et dalle béton armé). La hauteur des caissons métalliques varie de 0,82 m sur appuis à 0,34 m à la clé. La semelle inférieure de caisson est de largeur variable, de 1,34 m sur appuis à 1,52 m à la clé. La dalle de béton armé présente une épaisseur de 0,18 m. En profil en travers, la largeur utile de circulation est variable de 2,50 m en travées à 3,50 m au droit des appuis, offrant aux piétons et cyclistes un belvédère à chaque pile au-dessus de la Dordogne. Ainsi, un plan avec courbes et contre-courbes est conçu pour animer les parcours et favoriser l'observation et la découverte du paysage. Pour ces tabliers, les pièces de ponts sont de largeurs variables du côté des belvédères (figure 7).

La géométrie des ouvrages, fait des caissons métalliques des ouvrages de petites dimensions très ouvragés et architecturés (figure 8).

Matériaux

Les charpentes métalliques sont conçues en acier autopatinable, de nuance S355 et de qualité K2W+N ou J2W+N, conformément à la norme NF EN 10025-5 sur les aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique. Une épais-

3- Insertion - Pont de Fayrac devant le château.

4- Élévation de deux travées avec son reflet dans la Dordogne.

5- Coupe longitudinale du pont du Pech.

3- Fitting in - Fayrac Bridge in front of the castle.

4- Elevation view of two spans with reflection in the Dordogne.

5- Longitudinal section of Pech Bridge.

seur sacrificielle de 1 mm par face de tôle métallique exposée à l'air libre non confiné a été prise en compte pour le dimensionnement mécanique (épaisseur incluse dans le poids propre des charpentes mais déduite des sections résistantes de structure).

Mise en œuvre

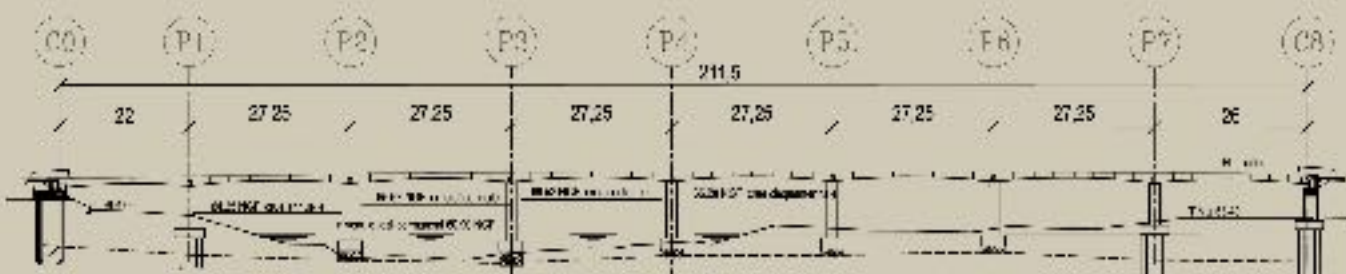
Les tabliers métalliques sont assemblés exclusivement par soudage. Les tronçons sont pré-assemblés en usine puis transportés par colis routiers. À ce stade du projet, il est envisageable de transporter les tabliers routiers en 2 ou 3 éléments transversalement et en 10 éléments longitudinalement. Pour les tabliers des passerelles, il pourra s'agir de 2 éléments transversaux et 10 éléments longitudinaux.

Pour les tabliers routiers, l'assemblage final est réalisé sur site, depuis l'aire de lancement située en rive droite de



4
© ALAIN SPIELMANN

COUPE LONGITUDINALE DU PONT DU PECH



5
© SETEC TPI



1
© SÉBASTIEN MARCHAL

VIADUC DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL (NRL) À LA RÉUNION : PRÉFABRICATION DU TABLIER

AUTEURS : PASCAL ALBERTELLI, INGÉNIEUR TRAVAUX, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - LUC RICHARD-HULIN, INGÉNIEUR PRINCIPAL MÉTHODES, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - DAVID BOREL, RESPONSABLE MÉTHODES, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - DIDIER PRIMAUT, DIRECTEUR ADJOINT MÉTHODES, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - PHILIPPE JUILLIEN, RESPONSABLE DES SITES DE PRÉFABRICATION, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION

LE CHANTIER DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL SE SITUE SUR L'ÎLE DE LA RÉUNION ET RELIERA LES COMMUNES DE SAINT-DENIS ET DE LA-POSSESSION. OUVRAGE TOUT BÉTON, LA CONSTRUCTION DU VIADUC EN MER DE 5 400 m EST ENTIÈREMENT PRÉFABRIQUÉE : FONDATIONS, PILES ET TABLIER. COMPOSÉ DE 1 386 VOUSOIRS, LE TABLIER EST RÉALISÉ SUR UN SITE DE PRÉFABRICATION DÉDIÉ À LA PRODUCTION DES VOUSOIRS COURANTS ET DES VOUSOIRS SPÉCIAUX DU VIADUC.

MODE DE CONSTRUCTION

L'ouvrage en béton est entièrement préfabriqué : fondations, piles et tablier. Les embases et chevêtres des appuis sont préfabriqués sur une aire dédiée dans le port, puis embarqués et mis en place au moyen de la barge *Zourite*. Le tablier est préfabriqué en voussoirs sur une aire dédiée dans la zone arrière du port Est.

Les voussoirs sur pile et les 2 premières paires de voussoirs courants de chaque fléau sont transportés, puis

assemblés sur l'aire de préfabrication des piles et embases.

Les ensembles ainsi constitués (Méga VSP) sont transportés en mer et mis en place sur les chevêtres des piles au moyen de la barge *Zourite*. Les autres voussoirs sont ensuite mis en place par encorbellements successifs au moyen d'une poutre de lancement évoluant sur le tablier.

Le marché est réalisé sur une variante du projet de base proposée par le groupement d'entreprises. Le DCE proposait

1 - Vue du site côté stockage.

1 - View of the site at storage end.

2 solutions de base pour le tablier du viaduc :

- Caisson en béton à hauteur constante avec des portées de 100 m ;
- Caisson en béton à hauteur variable avec des portées de 120 m.

La variante du groupement est un aménagement de la solution en caisson à hauteur variable avec portées de 120 m du DCE. Le groupement y a apporté les principales modifications suivantes (figure 2) :

- Un découpage en voussoirs de 4 m de long (au lieu de 2,30 m) ;
- Un câblage de précontrainte correspondant à ce découpage ;
- Une section du caisson sans nervure avec hourdis supérieur précontraint dans le sens transversal.

DESCRIPTION

Le tablier est constitué d'un caisson en béton à 2 âmes inclinées et à hauteur variable avec une largeur de 28,90 m. La hauteur du caisson varie de 7,30 m à l'axe de la pile à 3,80 m à mi-portée. L'ouvrage, d'une longueur de 5400 m environ, est découpé en 7 viaducs identiques de 773 m chacun séparés par des joints de dilatation. Chaque viaduc est composé de 5 travées de 120 m et 2 travées de rive de 84,6 m.

Chaque viaduc de 773 m est découpé en 6 fléaux de 120 m et 2 travées de rive de 26,30 m séparés par des joints de clavage de 0,28 m et 0,25 m.

Chacun des 42 fléaux de 120 m de long est constitué d'un voussoir sur pile de 7,30 m en 3 éléments et de 28 voussoirs courants de 4,015 m (14 par ½ fléau) préfabriqués à joints conjugués.

Une travée de rive est constituée d'un voussoir sur culée ou sur pile culée et de 5 voussoirs préfabriqués à joints conjugués.

Au total, le tablier préfabriqué est constitué de :

→ 126 voussoirs sur pile VSP ;



© VIADUC LITTORAL

2- Voussoir courant.

3- Aire de pré-fabrication.

2- Intermedia-te segment.

3- Prefabrica-tion area.

→ 1 176 voussoirs courants à hauteur variable (fléaux) ;

→ 14 voussoirs sur culée ou piles-culées ;

→ 70 voussoirs à hauteur constante (travées de rive).

Soient 1 386 voussoirs représentant un volume de 145 000 m³ de béton.

PRÉFABRICATION DES FLÉAUX

PRÉFABRICATION DES VOUSSOIRS SUR PILE (figure 4)

Les voussoirs sur pile VSP sont préfabriqués en 3 éléments conjugués :

→ Un élément central de 3,90 m de long d'un volume de 258 m³ ;

→ Deux éléments latéraux de 1,70 m de long d'un volume de 115 m³.

La réalisation d'un VSP sur un long banc ayant été estimée trop longue, la cellule de préfabrication a été conçue en 2 parties afin de permettre la préfabrication en parallèle d'un élément central et de 2 éléments latéraux.

L'élément central du VSP est bétonné sur une première position dans une cellule de coffrage. À cause de son poids de 670 t, il est déplacé transversalement sur son fond de moule par un chariot jusqu'à une deuxième position dans une seconde cellule de coffrage, où les 2 éléments latéraux du VSP sont bétonnés. Après achèvement et enlèvement au portique des 2 éléments latéraux, l'élément central est déplacé hors de la cellule par le chariot jusqu'à une troisième position de stockage. ▷



© TIMEINZEBBOX

Il est ensuite repris par un fardier multi-essieux automoteur Goldhofer pour être stocké.

Une seule cellule permet la production en pointe d'un voussoir sur pile complet (1 élément central et 2 éléments latéraux) en 10 jours ouvrés.

PRÉFABRICATION DES VOUSSOIRS COURANTS

(figure 5)

Les voussoirs courants ont une longueur de 4,015 m. Leurs hauteurs varient de 6,791 m pour le V1 à 3,80 m pour le V14 et leurs volumes de 108 m³ à 88 m³.

Les phases de préfabrication d'un demi-fléau sont les suivantes :

- Mise en place du VSP latéral en position contre-moule dans la cellule courante ;
- Réalisation du V1 avec le VSP latéral en contre-moule ;
- Décoffrage du V1, mise au stock du VSP latéral, déplacement du V1 en position contre-moule ;
- Réalisation du V2 et des autres voussoirs jusqu'au V14 ;
- Déplacement du V13 (contre-moule du V14) en position pour mise au stock ;
- Déplacement du V14 en position pour mise au stock ;
- Remise en configuration initiale (hauteur maximale) de la cellule : noyau intérieur, fond de moule et rehausses ;
- Redémarrage du cycle par la mise en place d'un VSP latéral.

Chaque voussoir courant est produit sur un cycle à 2 jours :



4

© VIADUC LITTORAL

- 1^{er} jour : précontrainte transversale du hourdis supérieur du voussoir N-1, décoffrage du voussoir N-1, déplacement du voussoir N-1 en position contre-moule, mise en place de la cage d'armatures du voussoir N, fermeture des coffrages ;

→ 2nd jour : bétonnage du voussoir N. Les voussoirs courants d'un demi-fléau sont réalisés à joints conjugués dans des cellules de type court. Six cellules permettent la production en pointe de 3 voussoirs courants par jour.

Les armatures sont préassemblées en cages mises en place d'un seul tenant dans la cellule au moyen d'un portique. Le béton est mis en place dans les cellules de coffrage par pompage au

4- Cellule de VSP.
5- Cellule de voussoir courant.

4- Segment-on-pier unit.
5- Intermediate segment unit.

moyen 2 pompes stationnaires installées sous les malaxeurs des centrales à béton. Le béton est pompé par un réseau de canalisations jusqu'aux cellules, où il est mis en place dans les coffrages au moyen de bras distributeurs de 18 m de rayon montés sur des mâts fixes. 9 mâts sont implantés auprès des cellules et 4 bras de distri-

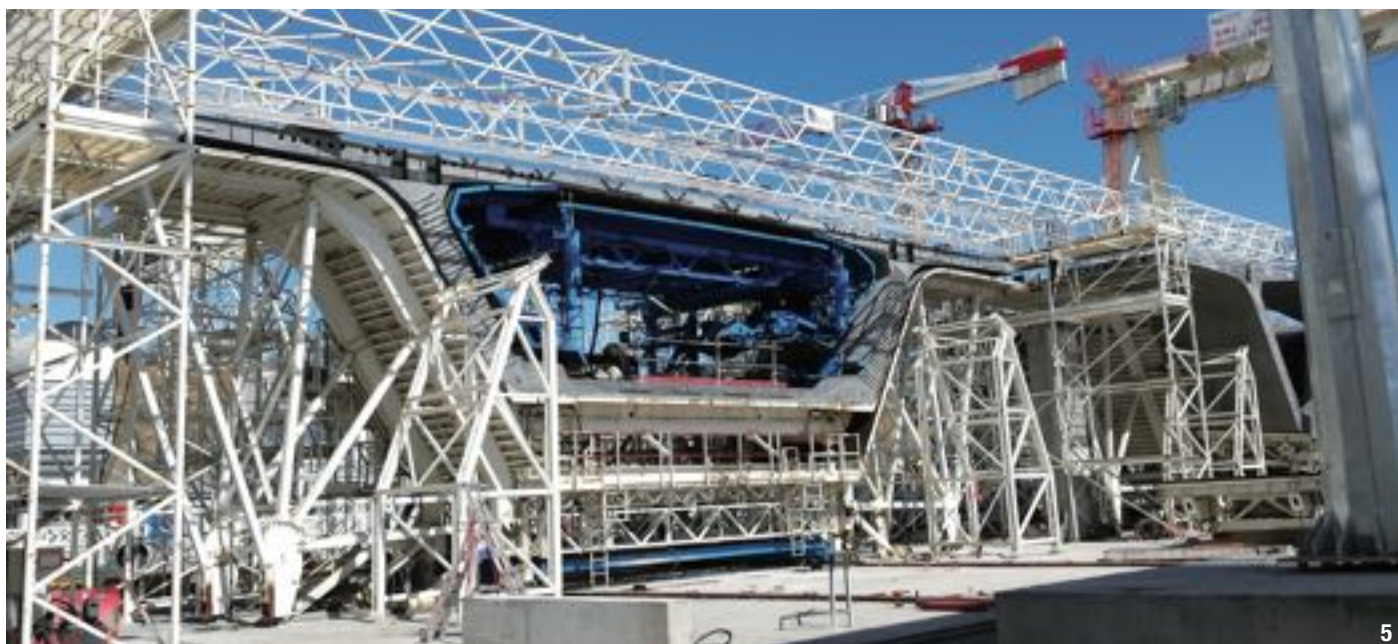
bution sont déplacés de mât en mât selon les bétonnages. La vibration du béton est réalisée au moyen d'aiguilles vibrantes (figure 6).

PRÉFABRICATION DES TRAVÉES DE RIVE

Chaque travée de rive (TdR) est constituée de 5 voussoirs courants de 4,275 et 4,400 m de long à hauteur constante 3,80 m et d'un voussoir sur pile ou sur pile-culée de 4,300 m de long.

Les 5 voussoirs courants sont conjugués. Un joint de clavage de 0,25 m est réalisé in situ entre le voussoir de culée et les voussoirs courants.

La travée de rive étant droite, les voussoirs courants sont préfabriqués sur un long banc. Le voussoir de culée d'un



5

© VIADUC LITTORAL



6

© VIADUC LITTORAL

volume de 200 m³ est réalisé séparément dans une cellule dédiée. Il est déplacé hors de la cellule au moyen d'un fardier multi-essieux automoteur Goldhofer à cause de son poids élevé (520 t).

INSTALLATIONS

L'usine de préfabrication des voussoirs (figure 7) est située sur le domaine dédié aux activités portuaires du port, dans une ancienne carrière sur une aire de 10 ha environ.

L'accès à la zone se fait par une rampe à 5% pour les véhicules légers et pour l'approvisionnement de l'usine.

Les voussoirs sont transportés vers le site de pose sur des fardiers multi-essieux automoteurs Goldhofer en

6- Bétonnage d'un voussoir courant.

7- Vue aérienne du site.

6- Concreting an intermediate segment.

7- Aerial view of the site.

empruntant une piste de chantier dans la carrière. La configuration de l'usine a été étudiée pour tenir compte des contraintes particulières du projet :

- Stockage des voussoirs de grande taille ;

- Production du béton sur le site ;
- Accès principal par une rampe ;
- Séparation des flux (véhicules légers, approvisionnement de l'usine et transports voussoirs) ;
- Saturation des engins de levage ;
- Interférences des grues et portiques.

AIRES DE PRÉFABRICATION

Les cellules de préfabrication des voussoirs (figure 8) occupent 3 zones pour une surface totale de 10 400 m².

Les cellules TdR et VSP sont installées sur une aire de 2 800 m² sous le portique de stockage.

Les 6 cellules de voussoirs courants sont alignées parallèlement au stock de voussoirs sur une aire de 5 200 m².

Les rehausses de fonds de moule des cellules courantes sont stockées et assemblées sur une aire parallèle de 2 300 m².

CENTRALE À BÉTON

Le béton du projet est produit sur le chantier. Sur une aire de 9 600 m², trois centrales à béton ELC 3000 (débit 80 à 100 m³/h) sont installées, ainsi qu'un stockage de granulats de 1 725 m³, une unité de production d'eau glacée et de paillettes de glace, une trémie d'attente Secatol de 10 m³, deux pompes stationnaires Putzmeister BSA 1405 E (débit max 55 m³/h), une centrale de traitement des eaux Bibko, un laboratoire et un bassin d'eau industrielle. Les centrales à béton servent à alimenter la production des voussoirs et la production des embases et chevêtres des appuis (figure 9).

ASSEMBLAGE DES ARMATURES

Les armatures, coupées et façonnées en usine, sont stockées sur le site, pré-assemblées en cages dans des gabarits, puis mises en place d'un seul bloc dans les cellules.

Trois aires de 6 500 m² chacune sont dédiées au stockage et à l'assemblage des armatures, deux pour les voussoirs courants des fléaux et une pour les VSP et voussoirs des travées de rive.

Les armatures des voussoirs courants des fléaux sont d'abord assemblées en sous-ensembles - hourdis inférieurs, âmes et hourdis supérieurs dans des pré-gabarits.

L'assemblage final des sous-ensembles est réalisé dans 6 gabarits complets au rythme de 3 cages par jour en pointe (figure 10).



7

© LOTDRONE



8

© SÉBASTIEN MARCHAL

Les armatures des voussoirs sur pile sont assemblées en cages complètes sur des gabarits-retourneurs.

Les cages étant plus hautes (7,30 m) que longues (1,70 m et 3,90 m), il est plus ergonomique de les assembler sur la tranche sur un plateau mobile servant de gabarit.

Après achèvement de la cage, le plateau est basculé à 90° au moyen du portique redressant la cage verticalement, qui est placée ensuite dans la cellule (figure 11).

STOCKAGE DES VOUSOIRS

Le stockage des voussoirs est organisé sur 3 niveaux pour les voussoirs de travée de rive, 2 niveaux pour les voussoirs courants V3 à V14 et sur un seul niveau pour les voussoirs courants

V1 et V2 et les voussoirs spéciaux (VSP latéraux). Les voussoirs courants sont posés sur 2 longrines longitudinales en béton axées sur les âmes des voussoirs.

L'aire de stockage s'étend sur 20 200 m² et a une capacité de 310 voussoirs - 290 courants et 20 spéciaux (VSP latéraux), soit 23% de la production totale (figure 12).

Les voussoirs sont levés et déplacés à l'aide d'un portique sur rails d'une capacité de 350 t, qui permet de lever les voussoirs les plus lourds (VSP latéraux de 305 t). Le portique a une portée de 65 m et une hauteur sous poutre de 24 m et sous palonnier de 21 m.

Les voussoirs sur pile-culée (520 t) et les éléments centraux (670 t) sont déplacés au moyen des fardiers multi-

8- Cellules des voussoirs courants.

9- Centrales à béton.

10- Gabarits d'assemblage des armatures des voussoirs courants.

8- Intermediate segment units.

9- Concrete mixing plants.

10- Jigs for assembly of intermediate segment frames.

essieux automoteurs de transport Goldhofer et sont stockés en dehors de la zone couverte par le portique de 350 t.

MOYENS DE LEVAGE

L'aire de préfabrication est desservie par 4 grues à tour et 2 portiques sur rail :

→ **G1** - une grue à tour Potain K5/50 avec une flèche de 60 m et une hauteur sous crochet de 45 m sur une voie de 130 m de longueur. Cette grue sert à la manutention des coffrages des cellules courantes (fonds de moule et châssis de calage) et à tous les levages nécessaires sur un atelier de préfabrication. Elle peut servir, en secours, au bétonnage des voussoirs à la benne.



9



10

© VIDUIC LITTORAL



11

© VIADUC LITTORAL



12

© SÉBASTIEN MARCHAL

- **G2 et G4** - deux grues à tour Potain MDT 368 avec flèches de 50 m et hauteurs sous crochet de 36 m sur voies de 40 m de longueur. Ces grues servent au déchargement des armatures, à la manutention des armatures et à la mise en place dans les gabarits des sous-ensembles d'armatures pour les voussoirs courants des fléaux.
- **G3** - une grue à tour Potain MD485 avec une flèche de 60 m et une hauteur sous crochet de 46 m sur une voie de 65 m de longueur.

11- Gabarits d'assemblage des armatures des VSP.
12- Stockage des voussoirs courants.

11- Jigs for assembly of segment-on-pier frames.
12- Intermediate segment storage.

- **P1** - un portique pour la mise en place des cages d'armatures des cellules courantes de 32 t de

capacité et de 27 m de largeur. Ce portique couvre les gabarits d'armatures et les cellules courantes. Il se déplace sur une voie de 284 m de longueur.

- **P2** - un portique de 350 t de charge et de largeur 65 m sur une voie de 470 m de longueur, ce portique sert au stockage et au chargement des voussoirs courants et éléments latéraux des VSP. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- 1 386** voussoirs
- 145 000 m³** de béton
- 10** cellules de coffrage :
 - 6 cellules de voussoirs courants
 - 1 cellule pour le VSP central
 - 1 cellule pour les VSP latéraux
 - 1 cellule de voussoir sur culée et pile-culée
 - 1 banc de travées de rive
- 3** centrales à béton ELC 3000
- 4** grues à tour
- 2** portiques : 26 t et 350 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRE D'OUVRAGE :** Région Réunion
- MAÎTRE D'ŒUVRE :** Egis
- GROUPEMENT D'ENTREPRISES DU MARCHÉ VIADUC :** Vinci Construction Grands Projets (mandataire), Bouygues Travaux Publics, Dodin Campenon Bernard, Demathieu Bard Construction
- ARMATURES :** Samt et Welbond
- CELLULES DE COFFRAGE VC ET TDR :** Ersem
- CELLULES DE COFFRAGE VSP :** Simpra
- GABARITS D'ARMATURES :** Coffrage&quipage
- PORTIQUE 350 t :** Deal
- PORTIQUE 26 t :** Bvs
- CENTRALE À BÉTON :** Europ'Equipement
- TUBES CINTRÉS :** Bartec
- PRÉCONTRAÎNTE :** Groupement Freyssinet-Vsl

ABSTRACT

VIADUCT ON THE NEW COASTAL ROAD ("NRL") ON REUNION ISLAND: DECK PREFABRICATION

PASCAL ALBERTELLI, VINCI - LUC RICHARD-HULIN, VINCI - DAVID BOREL, BOUYGUES TP - DIDIER PRIMAULT, VINCI - PHILIPPE JUILLIEN, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION.

The sea viaduct of the New Coastal Road on Reunion Island is entirely prefabricated: foundations, piers and deck. A dedicated 10-hectare prefabrication plant allows industrial production of 1,386 bridge segments to execute the 5.4km deck. Executed by match casting, the segments on piers, intermediate segments and end-span segments are prefabricated in 10 formwork units. Given the heavy weight of the components, up to 670 tonnes, a special site organisation and lifting equipment are needed. A dedicated concrete mixing plant is established on the production site. □

VIADUCTO DE LA NUEVA CARRETERA DEL LITORAL EN LA REUNIÓN: PREFABRICACIÓN DEL TABLERO

PASCAL ALBERTELLI, VINCI - LUC RICHARD-HULIN, VINCI - DAVID BOREL, BOUYGUES TP - DIDIER PRIMAULT, VINCI - PHILIPPE JUILLIEN, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION.

El viaducto sobre el mar de la Nueva Carretera del Litoral de La Reunión ha sido totalmente prefabricado: cimientos, pilotes y tablero. Una planta de prefabricación específica de 10 ha produce de forma industrial las 1.386 dovelas de la construcción para formar los 5,4 km de tablero. Realizadas con juntas conjugadas, las dovelas sobre pilote, las dovelas corrientes y las dovelas de vano de extremo se prefabrican en 10 células de encofrado. El peso importante de los elementos, hasta 670 t, requiere una organización particular del emplazamiento y medios de elevación. Se ha instalado una central de hormigón específica en el lugar de producción. □



1a

© SÉBASTIEN MARCHAL

VIADUC DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL (NRL) À LA RÉUNION : LE LANCEUR

AUTEURS : JOEL AUBIN, DIRECTEUR ADJOINT MÉTHODES ET PRIX, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - JEAN-NOËL DERYCKE, DIRECTEUR AU SERVICE MATÉRIEL, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - XAVIER BRUN, CHEF DE GROUPE AU SERVICE MATÉRIEL, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - ROMAIN LEONARD, DIRECTEUR TECHNIQUE, DEMATHIEU BARD

L'OUVRAGE PRINCIPAL DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL EST UN VIADUC À VOUSOIRS PRÉFABRIQUÉS, CONSTITUÉ DE 7 TRONÇONS IDENTIQUES DE 773 m CHACUN (86,65 m + 5x120 m + 86,65 m) ENCADRÉS PAR DES DIGUES EN REMBLAIS. LE TABLIER EST UN MONO-CAISSON DE 28,90 m. CETTE LARGEUR IMPORTANTE IMPLIQUE DES VOUSOIRS PRÉFABRIQUÉS LOURDS DE 290 t AU MAXIMUM POUR LES VOUSOIRS COURANTS. LA POUTRE DE LANCEMENT (LANCEUR), UTILISÉE POUR LA POSE DE CES VOUSOIRS LOURDS, A ÉTÉ CONÇUE ET FABRIQUÉE SPÉCIFIQUEMENT POUR CE PROJET.

TERMINOLOGIE ET ABRÉVIATIONS EMPLOYÉES DANS LE TEXTE

Lanceur : poutre de lancement permettant la pose des voussoirs préfabriqués.

Vn : voussoirs des fléaux courants.

Rn : voussoirs des travées de rives.

VSP : voussoir sur pile.

Méga VSP : partie de tablier constituée du VSP et des paires de voussoirs V1 &

V2. Cette partie, assemblée à terre, est transportée sur site et posée sur la pile par la barge *Zourite*.

VSC : voussoir sur les culées C0 ou C49, ainsi que les voussoirs sur les piles-culées au droit du joint de dilatation entre deux viaducs successifs.

Appuis AV ou AR : appuis principaux du lanceur, soit un appui avant et un appui arrière.

LE CHOIX DU TYPE DE LANCEUR

Dès l'étude de prix, le choix du groupement d'entreprises s'est porté sur des viaducs à voussoirs préfabriqués sur une aire à terre. Le transport sur le lieu de pose est réalisé par la route du littoral existante, au moyen de fardiers. Les ouvrages existants ont été renforcés en conséquence. Ce choix a été

fait pour réduire autant que possible les travaux en mer, et donc les aléas climatiques liés à la houle. La préfabrication à terre est également un choix judicieux pour garantir la qualité des bétons sans pollution par les ions chlorure.

Les fléaux courants des viaducs sont constitués de 3 éléments de VSP et de 14 paires de voussoirs courants d'une longueur constante de 4,015 m.



1b

© SÉBASTIEN MARCHAL

En complément, 1 VSC et 5 voussoirs d'une longueur de 4,40 m sont nécessaires pour compléter chacune des travées de rive. Lors des analyses techniques du projet, plusieurs types de lanceurs ont été envisagés :

→ Un lanceur court de 190 m environ. Avec ce type de lanceur, l'appui AV est situé au droit du VSP du fléau en cours de pose. L'appui AR est posé sur le demi-fléau précédent. Il génère donc des efforts de flexion sur les fléaux en cours de construction.

1a & 1b- Vues générales du lanceur.
2- Vue 3D du lanceur issue de la note de calculs.

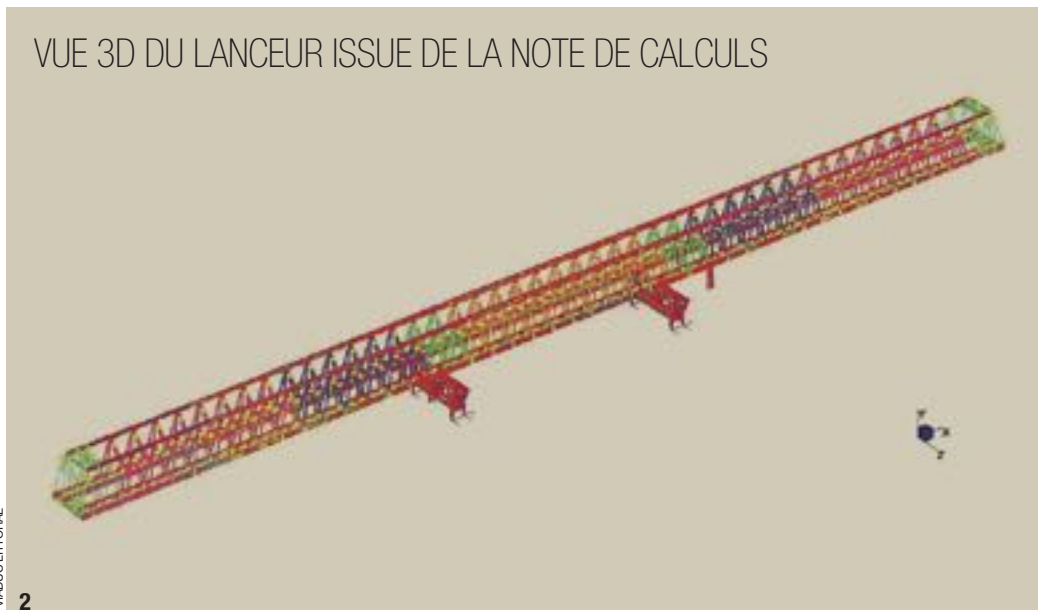
1a & 1b- General views of the launcher based on the design report.
2- 3D view of the launcher based on the design report.

- Un lanceur « mi-long » de 220 m environ. C'est la longueur minimale qui permet de positionner les deux appuis AV et AR au droit des VSP, et de faire des déplacements d'appui de VSP à VSP sans appui intermédiaire sur les fléaux en cours de construction.
- Un lanceur long de 280 m environ. Comme pour le lanceur « mi-long », les deux appuis sont au droit des VSP, et la pose du demi-fléau avant est réalisée avec la béquille en appui sur le VSP n+1.

Le choix du groupement d'entreprises s'est porté sur le lanceur long pour les raisons suivantes :

- Les appuis sont systématiquement positionnés au droit des VSP. Cela élimine les efforts de flexion sur les fléaux en cours de construction et les éventuels renforts de ferrailage ou de précontrainte nécessaires pour la reprise de ces efforts.
- L'appui de la béquille AV sur le VSP n+1 permet de supprimer la pose des voussoirs du demi-fléau avant avec la partie avant du lanceur en porte-à-faux, cas de chargement très dimensionnant pour le lanceur. Cet appui permet également d'avoir un accès terrestre au VSP n+1, ce qui permet de réaliser les travaux préparatoires sur ce VSP pendant la pose du fléau n.
- Les déplacements des appuis se font de pile à pile, ce qui génère un gain de temps lors de l'avancement du lanceur. La simplification des déplacements des appuis est également un facteur de sécurité, cette phase étant une des plus critiques pour la stabilité du lanceur.

VUE 3D DU LANCEUR ISSUE DE LA NOTE DE CALCULS



© VIADUC LITTORAL

2

CAHIER DES CHARGES DE LA CONCEPTION

Les principaux éléments du cahier des charges pour la conception du lanceur sont les suivants :

- Lanceur long permettant l'accès au VSP n+1 pendant la pose du fléau n. ▷

- Pose par encorbellements successifs des V3 à 14. Hauteur variable de 5,84 m à 3,80 m, longueur constante de 4,015 m, poids variable de 250 à 290 t.
- Pose par suspension de la travée de rive complète des R01 à R05. Poids variable de 276 à 290 t, soit un poids total suspendu d'environ 1 400 t (hors équipement tel que palonniers, etc.).
- Pose des deux VSP C0 et C49 d'un poids unitaire de 550 t environ.
- Géométrie du tablier :
 - Pente longitudinale maximale : +/- 0,7%,
 - Pas de dévers, profil en toit avec pentes de +/- 2,5%,
 - Profil en plan avec rayon minimum de 1 500 m.
- Vent au niveau du lanceur :
 - Vent de service de 10 m/s pour les phases de lancement et 20 m/s pour les phases de pose des voussoirs,
 - Vent maximum de 37 m/s pour les phases hors service et hors période cyclonique,
 - Vent extrême de 63 m/s pendant les périodes cycloniques.
- Transport sur site : chaque élément doit pouvoir être transporté en container 40'.

La conception générale est la suivante :

- Lanceur bipoutre de section triangulaire.
- Les poutres principales reposent sur les balanciers des appuis principaux. Ceux-ci sont équipés de 64 moteurs électriques (4x16 u) pour assurer les déplacements des poutres sur les appuis (phases de lancement). Cette fonction, habituellement assurée par des dispositifs de câbles et cabestans ou par les ponts roulants, a été retenue du fait de la faible pente longitudinale. Le risque de glissement des poutres sur les appuis est maîtrisé.
- 2 ponts roulants principaux de capacité unitaire de 310 t, et avec un ajustement latéral de la charge de +/- 1 m.
- 2 ponts roulants auxiliaires de 15 t au niveau des membrures inférieures des poutres principales.
- 2 béquilles articulées.

CALCULS

Les calculs du lanceur sont faits suivant les Eurocodes.

En complément des vérifications des cas standards de service ou hors service définis au cahier des charges, des vérifications complémentaires pour



3 © SÉBASTIEN MARCHAL

les phases de montage et de transport sur la barge *Zourite* ont été effectuées. La structure du lanceur a été vérifiée en considérant les accélérations subies pendant le transport. Les poutres principales et les pylônes ont entièrement été vérifiés et renforcés pour cette phase spécifique (figure 2).

FABRICATION EN USINE

Le lanceur a été fabriqué dans les ateliers Cimolai Technology en Italie.

3- Montage sur l'aire de préfabrication des voussoirs.

4- Montage au port.

3- Assembly on the segment pre-fabrication area.

4- Assembly in the port.

Pour garantir le montage et la parfaite géométrie des poutres, un processus de fabrication adapté a été mis en place. Les étapes principales de ce processus sont les suivantes :

- Soudage automatique des PRS des membrures hautes et basses des poutres principales. Les épaisseurs de tôle varient de 25 à 60 mm en fonction des tronçons de poutre.
- Dressage des faces d'about des PRS à la fraise pour mise à la longueur des PRS et pour assurer le parallélisme des deux abouts.
- Soudage manuel des plaques d'about et blocs de connexion des éléments de poutre.
- Soudage manuel sur les PRS des goussets de fixation des diagonales.
- En fin de soudage, l'usinage final des plaques d'about des PRS (faces de contact entre éléments et perçage des trous de passage des tiges ou boulons de connexion) et l'alésage des trous des goussets de fixation des diagonales ont été réalisés. La machine utilisée permet l'usinage de pièces de plus de 12 m de longueur.

L'usinage final des éléments de connexion (abouts des PRS et diagonales) a permis de corriger les déformations des PRS liées au soudage. Un montage d'essai de 3 tronçons des poutres principales a été réalisé en atelier pour contrôler la bonne faisabilité du montage, la bonne géométrie et pour valider les procédures d'assemblage. Les éléments mécaniques comme les appuis principaux et les ponts roulants,



4 © SÉBASTIEN MARCHAL

ont été entièrement pré-montés et testés en atelier.

Les câblages des circuits électriques et électromécaniques ont été installés en atelier. Ces dispositions ont permis de réduire les risques inhérents aux travaux de montage en hauteur sur site (figure 3).

L'ensemble des éléments du lanceur ont été transportés sur site en containers (environ 150 containers 40').

MONTAGE

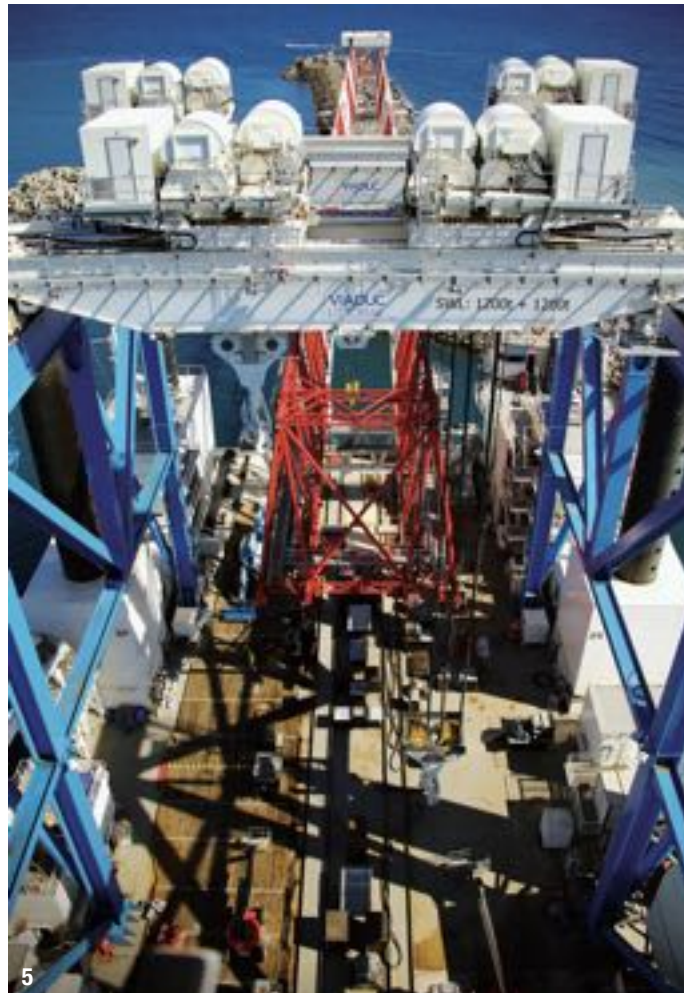
Compte tenu des dimensions importantes du lanceur, la durée totale nécessaire au montage et à l'assemblage des éléments, ainsi que les tests de fonctionnement et les tests en charge est de 9 mois.

La méthode habituelle consiste à monter le lanceur sur la trace derrière la culée.

Compte tenu de l'exiguïté de la zone derrière la culée C49 d'une part, et de l'interface importante avec les travaux de remblaiement de la digue derrière la culée (réalisés dans le cadre d'un autre marché) d'autre part, le groupement d'entreprises s'est orienté vers un montage au port et vers un transport du lanceur complet par la barge *Zourite*. Cette solution a permis de réaliser le montage, les tests de fonctionnement, ainsi qu'une partie des tests en charge, sans attendre la fin des travaux de la digue et ainsi de gagner 4 à 6 mois.

LE MONTAGE AU PORT

Le montage s'est déroulé en deux phases :



© GWENOLE DE KERMENGY

5- Opérations de chargement sur la barge *Zourite*.

6- Transport en mer du lanceur par *Zourite*.

5- Loading operations on *Zourite* barge.

6- Sea transport of the launcher by *Zourite*.

→ Le montage des éléments des poutres principales sur l'aire de stockage des voussoirs préfabriqués (figure 4).

→ L'assemblage complet sur la digue Est du port (ou tenon Est), avant son transfert sur *Zourite*.

La réception des containers et l'assemblage des éléments de poutres ont nécessité une surface logistique importante. Ces opérations ont été réalisées sur l'aire de stockage des voussoirs, non saturée à cette période. Afin de

minimiser les travaux en hauteur, les éléments de poutres triangulaires ont été montés couchés dans des gabarits de montage, puis relevés à la grue automotrice.

Après montage, les éléments ont été transportés par les fardiers de transport des voussoirs jusqu'au tenon Est du port. Ces éléments avaient une longueur de 12 ou 24 m en fonction de leur poids. L'assemblage a été réalisé avec la grue mobile portuaire louée au port (grue Liebherr LHM400).

Le tenon Est n'est pas suffisamment large pour permettre le positionnement de la grue latéralement au lanceur à monter. La grue a été positionnée sur un emplacement fixe près de l'enracinement du tenon.

Après montage des deux appuis principaux sur des fondations provisoires, les éléments de poutre ont été montés par tronçon de 12 ou 24 m en fonction de leur poids. Au fur et à mesure du montage, les poutres ont été reculées vers l'extrémité du tenon Est en utilisant les moteurs des appuis principaux.

Une palée provisoire, constituée de 4 mâtures de grues et d'un chevêtre spécial, a été utilisée pour réduire la longueur en porte à faux, côté extrémité du tenon, qui excédait la longueur maximale admissible de 140 m.

Après montage des deux poutres principales et de leurs contreventements d'extrémités, les ponts roulants, les ponts auxiliaires et les béquilles ont été installés. Le solde des équipements (passe-relles, garde-corps, etc.) n'ayant pu être montés en atelier a été installé en place. ▷



© SEBASTIEN MARCHAL



7

© SÉBASTIEN MARCHAL

En fin de montage, les poutres ont été déplacées pour les équilibrer sur les deux appuis principaux et les dégager de la palée provisoire de montage.

Les tests de fonctionnement, de lancement, ainsi que les tests en charge de ponts roulants ont été réalisés avant chargement du lanceur sur *Zourite*.

CHARGEMENT SUR ZOURITE ET TRANSFERT SUR SITE

CHARGEMENT SUR ZOURITE

Pour charger le lanceur, la barge *Zourite* s'est positionnée dans le port en alignement et au niveau du lanceur. Des semelles en béton ont été préalablement coulées sur le pont de *Zourite* afin de diffuser les charges sur une surface suffisante.

Le lanceur a ensuite été déplacé sur la barge par lancement et déplacement des appuis (figure 5).

La béquille côté lancement n'étant pas utilisable du fait de la géométrie du pont, c'est l'un des ponts 2400 t de *Zourite* qui a été utilisé pour soutenir les poutres pendant le déplacement de l'appui. À la fin de l'opération, le lanceur est

positionné centré sur ses deux appuis distants de 66 m, avec des porte-à-faux de 106 m. Cette configuration, non standard au cahier des charges initial, a été vérifiée en intégrant les effets dynamiques liés à la navigation (figure 6).

INSTALLATION SUR SITE

La première pile du viaduc (P48), ainsi que son Méga VSP ont été posés par *Zourite* avant l'acheminement du lanceur. Le VSC de la culée C49 a été transporté par *Zourite* pour stockage temporaire sur le Méga VSP. Un appui provisoire A50, à 120 m de la pile P48, donc derrière la culée C49, a été intégré lors de la construction de la digue en remblai.

La barge *Zourite* s'est positionnée dans l'axe du viaduc, approximativement à l'emplacement de la deuxième pile P47 non posée. Elle s'est ensuite élevée afin de positionner le pont au niveau du Méga VSP48 (environ 20 m au-dessus de l'eau).

Le lanceur a ensuite été déplacé par lancements successifs et transferts des appuis. En fin d'opération, les appuis

7- Lancement sur la pile P48.

8- Pose du VSC49.

9- Pose d'un fléau courant.

7- Launching on pier P48.

8- Placing VSC49.

9- Placing a standard cantilever section.

Il ne peut non plus être transporté par la route, les ouvrages existants n'étant pas dimensionnés pour le poids du voussoir, soit 550 t. Il a donc été stocké temporairement par *Zourite* sur le Méga VSP48, en attente de pose au lanceur.

Dès sa conception, le lanceur a été étudié pour permettre la pose de ce voussoir, en couplant les deux ponts roulants de 310 t. Après les tests de charge réalisés en utilisant des poches remplies d'eau de mer, le voussoir a été pris par les deux ponts et déplacé de 80 m environ pour être posé sur la culée C49 (figure 8).

POSE D'UN FLÉAU COURANT DE 120 m

Un fléau courant est constitué d'un VSP et de 14 paires de voussoirs, de V1 à V14. Le VSP ainsi que les deux paires V1 et V2, sont posés par la barge *Zourite*. Le lanceur pose le solde, soit les paires V3 à V14.

La pose des paires V3 à V6 est faite avec la béquille AV non appuyée sur le Méga VSP n+1. Ceci permet de faire

principaux du lanceur sont positionnés sur P48 et A50 distants de 120 m. Il s'agit de la configuration de pose d'un fléau standard, permettant de finaliser les tests de pose d'un fléau standard et de pose du VSC49 (figure 7).

POSE DES VOUSSOIRS POSE DU VSC49

Le VSC49 ne peut être posé sur la culée par *Zourite*, la culée étant intégrée à la digue en remblai.



8

© SAMI CHALAK



9

© SÉBASTIEN MARCHAL



© SEBASTIEN MARCHAL

10

simultanément le réglage du Méga VSP n+1, ainsi que son clouage à la pile. Après pose de V6, la béquille est mise en appui pour la pose de V7 à V14. Les ponts roulants étant équipés de dispositifs de réglage transversal de +/- 1 m, la pose d'un fléau courbe au rayon 1 500 m est possible sans aucun mouvement transversal du lanceur (figure 9).

DÉPLACEMENT DU LANCEUR

Le déplacement des appuis principaux est un principe « par-dessus » : l'appui AR pivote de 90° pour être déplacé par l'un des ponts roulants en passant au-dessus de l'autre appui. Ce système permet d'avancer le lanceur d'un fléau avec un seul mouvement d'appui. Le choix d'un lanceur long permet également des déplacements de pile à pile, sans appui intermédiaire sur les fléaux en phase de construction. Ceci permet de ne pas introduire d'efforts de flexion dans les fléaux ni de déséquilibre dans la pile et de faire les déplacements d'appui pendant les phases de clavage des fléaux.

10- Pose d'une travée de rive.

10- Placing an end span.

POSE D'UNE TRAVÉE DE RIVE

Les VSC sur piles-culées sont posés par la barge *Zourite*. Les 5 voussoirs constitutifs d'une travée de rive sont suspendus au lanceur, sur des chevêtres métalliques intégrés aux poutres principales du lanceur. Le poids total de la charge suspendue est de 1 400 t environ.

Chaque voussoir est suspendu par 4 barres en acier haute résistance. Après assemblage des 5 voussoirs entre eux, puis clavage avec le VSC d'un côté et avec l'extrémité du fléau de l'autre, la précontrainte est mise en tension. La charge est libérée par paliers au cours de la mise en tension des câbles (figure 10). □

PRINCIPALES QUANTITÉS

LONGUEUR : 278 m

POIDS : 2 200 t

PONTS ROULANTS PRINCIPAUX : 2 ponts de capacité unitaire 310 t

PONTS ROULANTS AUXILIAIRES : 2 ponts de capacité unitaire 15 t

VOUSSOIRS : 1 080 à poser (1 008 voussoirs courants, 70 voussoirs de rives et 2 voussoirs sur culée)

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE :

Région Réunion

MAÎTRE D'ŒUVRE :

Egis

GROUPEMENT D'ENTREPRISES EN CHARGE DES ÉTUDES ET DE LA CONSTRUCTION DU VIADUC :

Vinci Construction Grands Projets (mandataire), Bouygues Travaux Publics, Dodin Campenon Bernard, Demathieu Bard Construction.

ÉTUDES ET CONSTRUCTION DE LA POUTRE DE LANCEMENT :

Cimolai Technology SpA - Special Equipment.

CONTRÔLE EXTÉRIEUR DES ÉTUDES ET DE LA FABRICATION DE LA POUTRE DE LANCEMENT :

Apave

ABSTRACT

VIADUCT ON THE NEW COASTAL ROAD ("NRL") ON REUNION ISLAND: THE LAUNCHER

JOEL AJUBIN, BOUYGUES TP - JEAN-NOËL DERYCKE, BOUYGUES TP - XAVIER BRUN, BOUYGUES TP - ROMAIN LEONARD, DEMATHIEU BARD

The sea viaduct of the New Coastal Road on Reunion Island is a very wide viaduct (30 metres). *The launching girder, designed and built specifically for this project, is of exceptional dimensions, i.e. 280 metres long and of total weight 2200 tonnes. It was designed and built in Italy by Cimolai Technology. The company employed an innovative method for placing the launching girder using the Zourite barge, also built specifically for this project, permitting significant time saving.* □

VIADUCTO DE LA NUEVA CARRETERA DEL LITORAL EN LA REUNIÓN: EL LANZADOR

JOEL AJUBIN, BOUYGUES TP - JEAN-NOËL DERYCKE, BOUYGUES TP - XAVIER BRUN, BOUYGUES TP - ROMAIN LEONARD, DEMATHIEU BARD

El viaducto sobre el mar de la Nueva Carretera del Litoral de La Reunión es un viaducto de gran anchura (30 m). *La viga de lanzamiento, estudiada y construida específicamente para este proyecto, tiene unas dimensiones poco habituales: 280 m de longitud y un peso total de 2.200 t. Ha sido estudiada y construida en Italia por la empresa Cimolai Technology. El innovador método utilizado para la colocación de la viga de lanzamiento utilizando la barcaza Zourite, también construida especialmente para este proyecto, ha permitido un importante ahorro de tiempo.* □



1
© VIADUC LITTORAL

VIADUC DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL (NRL) À LA RÉUNION : PRÉFABRICATION DES 48 PILES ET ASSEMBLAGE DES MÉGA VSP

AUTEURS : EMELINE ESPALIEU, INGÉNIEUR TRAVAUX, DODIN CAMPENON BERNARD - ANTOINE AFETTOUCHE, CHEF DE SECTEUR PRÉFABRICATION DES APPUIS, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - ROMAIN LEONARD, DIRECTEUR TECHNIQUE, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION

LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL (NRL) PERMETTRA AUX HABITANTS DE L'ÎLE DE LA RÉUNION, DANS L'OCÉAN INDIEN, DE RELIER EN TOUTE SÉCURITÉ SAINT-DENIS, LA CAPITALE AU NORD, ET LA ZONE ÉCONOMIQUE DU PORT AVEC LA POSSESSION SITUÉE UNE VINGTAINNE DE KILOMÈTRES PLUS À L'OUEST. ELLE REMPLACERA L'ACTUELLE ROUTE EN CORNICHE (RN1) SITUÉE AU PIED D'UNE FALAISE QUI S'ÉBOULE RÉGULIÈREMENT. LE VIADUC DE 5 400 m, PLUS LONG VIADUC DE FRANCE EN CONSTRUCTION, EST L'OUVRAGE LE PLUS IMPORTANT DE CETTE NOUVELLE ROUTE. IL REPOSE SUR 48 PILES EN MER OUVERTE, DE PRÈS DE 7 000 t, ENTIÈREMENT PRÉFABRIQUÉES.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Les principales caractéristiques techniques de cet ouvrage hors-norme ont déjà été présentées, ainsi que le contexte maritime dans lequel il a été conçu (*Travaux* N°933, juin 2017, *Viaduc de la Nouvelle Route du Lit-*

toral : les fondations d'un colosse des mers). Il est composé de 7 viaducs élémentaires indépendants, dont les extrémités reposent sur des piles-culées. Le viaduc s'appuie au total sur 48 piles en mer. Chaque tronçon comprend 7 travées (5 travées de

1- Lignes de production des embases.

1- Base production lines.

120 m et 2 travées de rive de 85 m). Le tablier est un caisson en béton précontraint réalisé par la méthode des voussoirs préfabriqués à joints conjugués, mis en place par encorbellements successifs grâce à un lanceur spécifique.

La fabrication des voussoirs et la mise en place de ces voussoirs font l'objet d'articles séparés.

Chacun des 7 tronçons comporte :

- 2 piles culées à ses extrémités ;
 - 1 pile fixe permettant de reprendre l'ensemble des efforts horizontaux longitudinaux issus du tablier (freinage, séisme) ;
 - 5 piles courantes.
- On dénombre donc :
- 6 piles culées ;
 - 7 piles fixes ;
 - 35 piles courantes.

Tous les appuis du viaduc sont fondés superficiellement sur des semelles en béton armé.

2- Embase de la pile P31 : semelle de fondation et partie basse du fût.

3- Tête de pile : partie haute du fût et chevêtre.

2- Base of pier P31: foundation slab and lower part of the shaft.

3- Pier cap: upper part of the shaft and cap.



© VIADUC LITTORAL

2



© VIADUC LITTORAL

3

En fonction du contexte géotechnique et des efforts appliqués aux fondations, il existe deux dimensions de semelle, diamètre 20 m et diamètre 23 m. Suivant la conception initiale du marché, les piles culées et les piles fixes sont fondées sur des semelles de 23 m de diamètre et les piles courantes sur des semelles de 20 m de diamètre. Initialement, on dénombre donc :

- 35 semelles de 20 m de diamètre ;
- 13 semelles de 23 m de diamètre.

Suite aux reconnaissances puis aux études géotechniques, les évolutions suivantes ont dû être intégrées :

- Le sol de fondation de 11 piles a dû être amélioré (vibroflottation avec ou sans incorporation) ;
- La pile fixe 32 étant fondée sur le basalte son diamètre a pu être réduit à 20 m ;
- Les semelles des piles courantes 5 et 39 ont dû être portées à 23 m.

DESCRIPTION DES APPUIS

Chaque appui est réalisé en deux parties. L'embase comprend la semelle et la partie inférieure du fût de pile permettant d'atteindre un niveau d'environ 3 m au-dessus du niveau de l'eau. La tête de pile comprend la partie haute du fût et le chevêtre. Les deux parties sont reliées entre elles par un joint de clavage intégré dans l'embase de 1,50 m de hauteur (figures 2 et 3). Les semelles circulaires font 2,40 m d'épaisseur. Elles sont surmontées de 2 podiums octogonaux de 0,80 m d'épaisseur chacun. Le fût de pile est creux, de forme elliptique de grande base 10,00 m et de petite base 7,00 m, d'épaisseur constante 1,10 m. Une nervure architecturale court le long du fût sur chaque face de la grande base de l'ellipse. Les embases sont équipées d'un système de protection cathodique destiné à augmenter le niveau de protection vis-à-vis de la corrosion des parties de l'ouvrage situées dans la zone d'immersion et dans la zone de marnage. Les chevêtres, préfabriqués avec la partie supérieure du fût, assurent la transition entre la forme elliptique du fût et la tête de pile par l'intermédiaire de l'épanouissement de la nervure architecturale du fût. Le chevêtre pour pile courante et fixe a une largeur de 11 m, le chevêtre de pile culée une largeur de 14,50 m. La tête de pile comprend les appareils d'appuis, les réservations nécessaires à la construction (zones de calage, passage des câbles de clouage et de levage) et une "baignoire" pour les besoins de visite et de maintenance. ▷



© SEBASTIEN MARCHAL

Dans la zone dite de la Pointe du Gouffre, certaines piles sont équipées de dispositifs permettant la création d'habitats artificiels. Ces dispositifs consistent à offrir des supports à même de favoriser le développement d'une faune et d'une flore fixée riche en ciblant les espèces coralliennes (figure 4).

PRINCIPE DE PRÉFABRICATION

Pour assurer la plus grande sécurité, favoriser l'ergonomie des postes de travail et améliorer la qualité de l'ouvrage (durabilité), la totalité des piles est fabriquée à terre sur une zone dédiée (3 ha),

équipée d'un quai de chargement de 100 m conçu et réalisé spécifiquement pour les besoins du chantier.

Les dimensions et les poids des pièces à préfabriquer sont conséquents :

→ Pour les embases, le poids est compris entre 3 500 t et 4 500 t, la hauteur varie de 15 à 18 m, et le diamètre de la semelle est de 20 ou 23 m ;

→ Pour les têtes de pile, le poids est compris entre 1 250 t et 2 250 t, la hauteur varie de 9 à 21,50 m.

Les voussoirs qui composent l'amorce du tablier au droit des piles sont

4- Modules d'éco-conception.

5- Assemblage d'un Méga VSP.

6- Aire de pré-fabrication des piles.

4- Ecodesign modules.

5- Assembly of a mega-segment on pier.

6- Pier prefabrication area.

assemblés sur ce site de préfabrication.

Ce Méga voussoir sur pile (VSP) est également posé par *Zourite*, barge pour les travaux en mer, dans la même séquence que la pose de la tête de pile. Cela confère à l'ensemble de la pile réassemblée un poids suffisant pour assurer sa stabilité pendant les phases provisoires.

Le Méga VSP est constitué de :

- 1 voussoir sur pile central ;
- 2 voussoirs sur pile latéraux ;
- 2 voussoirs courants V1 ;
- 2 voussoirs courants V2.



© SEBASTIEN MARCHAL



© SEBASTIEN MARCHAL
7

Ses dimensions en plan sont de 28,90 m x 23,40 m pour une hauteur de 7,30 m et un poids d'environ 2400 t (figure 5).

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'AIRE DE PRÉFABRICATION DES PILES

L'aire de préfabrication (figure 6), située dans l'enceinte du Port Est s'organise autour de deux lignes de préfabrication et d'une ligne de char-

7- Système de ripage Hebetec.
8- Vue en élévation du principe de ripage.

7- Hebetec sliding system.
8- Elevation view of sliding method.

gement orientée à 90°. Sur chaque ligne de préfabrication, les pièces sont préfabriquées selon des positions successives convergeant vers la ligne de chargement centrale :

- 1^{re} position (dite "podium") : ferrailage et coulage de la semelle (pour les embases), du fût haut de pile (pour les têtes de pile) ;
- 2^e position : ferrailage et bétonnage du fût bas (pour les embases), du chevêtre (pour les têtes de pile) ;

- 3^e position : finitions, équipement en passerelles et accès pour le voyage en mer ;
 - 4^e position (pour les embases uniquement) : position de stockage ;
 - 5^e position pour les embases (4^e pour les têtes de piles) : position de chargement sur la ligne centrale.
- Les pièces sont déplacées d'une position à l'autre en utilisant un système de 2 trains de 12 vérins de levage de 250 t couplés hydrauliquement et surélevés par rapport à leur rail de glissement sur coussins d'air (figures 7 et 8).

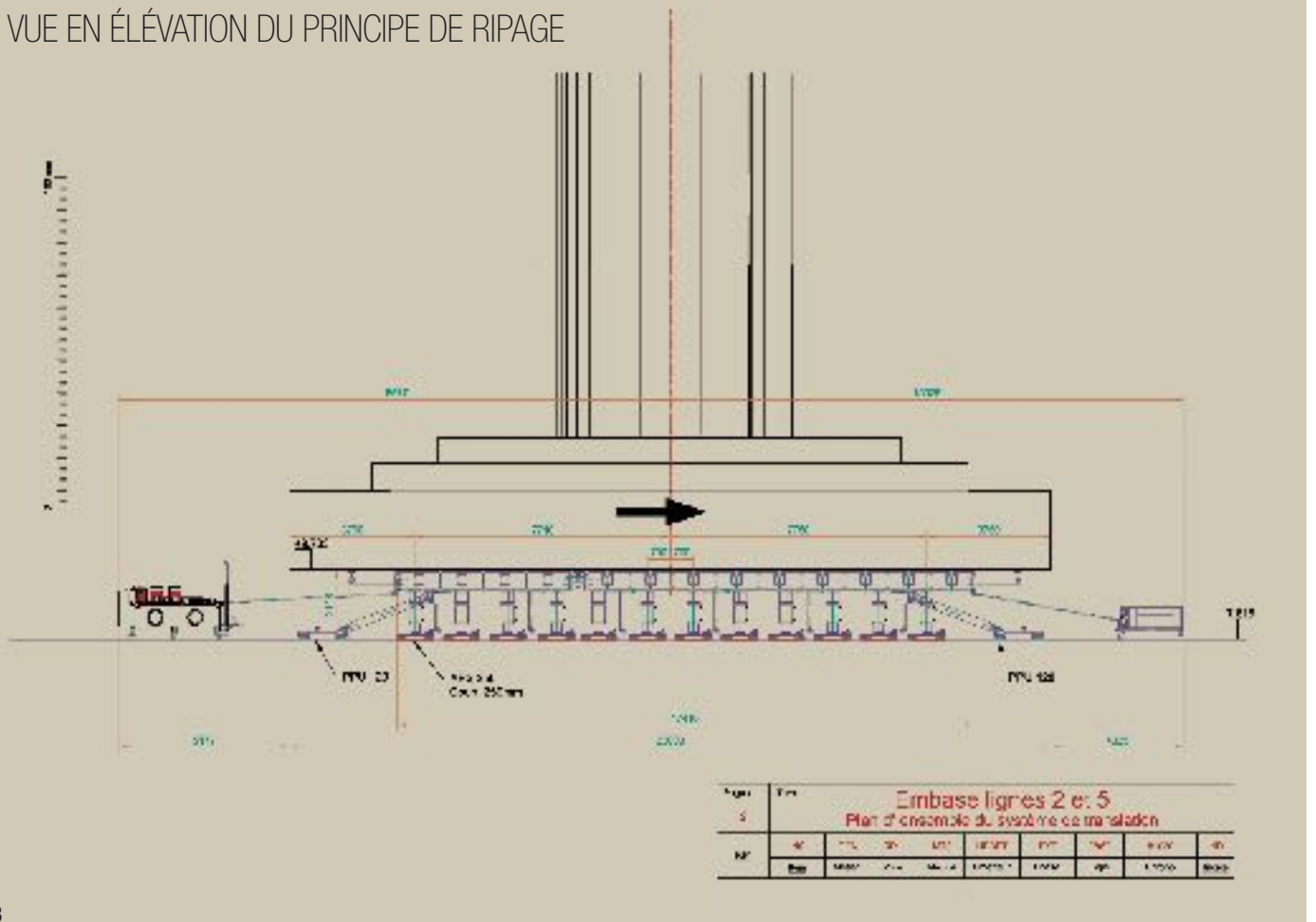
Cette technologie permet de diminuer fortement les coefficients de frottement à l'interface rail/vérin et d'obtenir une valeur avoisinant 0,2% de frottement.

LES MOYENS DE LEVAGE

Toutes les zones de travail sont couvertes par 3 grues à tour :

- Grue G1 sur rails pour les embases : 20 t de capacité au fût et 32,50 m de hauteur sous crochet.
- Grue G2 sur rails pour les têtes de piles : 25 t de capacité au fût et 41,00 m de hauteur sous crochet. ▷

VUE EN ÉLÉVATION DU PRINCIPE DE RIPAGE



© VIADUC LITTORAL
8

→ Grue G3 fixe pour les Méga VSP :
8 t de capacité au fût et 16,50 m
de hauteur sous crochet.

À cela s'ajoute une grue mobile à chenille de capacité 60 t qui sert essentiellement aux activités de ferrailage. Cette grue équipée d'un double moufle effectue le retournement des cages de ferrailage des fûts préfabriqués sur des gabarits horizontaux.

LA PRÉFABRICATION DES SEMELLES

Le ferrailage des semelles est, pour sa grande partie, réalisé en place sur les podiums.

Le coffrage est posé à l'avancement et le bétonnage (1 025 m³ ou 1 349 m³ pour les semelles respectivement de 20 m et 23 m) s'effectue en une opération (bétonnage continu de 13 heures et de 16 heures pour les semelles respectivement de 20 m et 23 m) (figure 9).

LA PRÉFABRICATION DES FÛTS BAS

Les fûts bas se composent chacun de 2 levées.

La hauteur de ces levées varie de 4 m à 6,7 m afin de s'adapter au niveau variable du niveau de fondation, le niveau supérieur du fût bas étant fixé à 3 m au-dessus du plan d'eau pour minimiser les efforts dus à la houle en phase provisoire, tout en permettant un accès sécurisé.



9

© VIADUC LITTORAL

Le ferrailage des fûts bas est préfabriqué sur des gabarits. Quatre quarts de fûts sont préparés à l'horizontale avec incorporation des inserts de la protection cathodique, puis les cages sont retournées et stockées verticalement (figure 10).

Une fois posés, les quarts sont éclissés autour du coffrage intérieur préalablement posé.

Le coffrage est composé d'un noyau intérieur séparé en 2 demi-coquilles et de 4 panneaux extérieurs. Les coffrages ont été conçus autour de 6 contraintes (figure 11) :

→ Les problématiques d'accès à chaque phase de travaux suivant la hauteur des levées ;

9- Préfabrication d'une semelle.

10- Gabarits de fabrication des armatures des fûts bas.

11- Coffrage d'une seconde levée de fût bas.

9- Prefabrication of a foundation slab.

10- Jigs for production of the frames of low shafts.

11- Formwork for a second concrete lift for the low shaft.

→ La technologie des coffrages sans tige traversante qui conduit à une augmentation du poids des coffrages limité à 11 t par le moyen de levage ;

→ La reprise de la poussée béton ;

→ L'ergonomie ;

→ Le nombre de réutilisations ;

→ La zone de clavage de 1,50 m situé dans la deuxième levée.

LA PRÉFABRICATION DES FÛTS HAUTS

Les fûts hauts se composent de 1 ou 2 levées. La hauteur de ces levées varie de 3 m à 7,6 m selon le profil en long de l'ouvrage. Le ferrailage est conçu sur le même découpage que celui du



10



11

© VIADUC LITTORAL



© VIADUC LITTORAL
12

fût bas. Le coffrage extérieur est également découpé en 4 panneaux. En revanche, le coffrage intérieur est différent car les contraintes d'accès et de poids ne sont pas les mêmes. Ainsi, le noyau intérieur est conçu en anneaux complets et se décoffre en une fois, la capacité de levage étant de 25 t.

12- Décoffrage d'un chevêtre courant.
13- VSP latéral en rotation.

12- Formwork removal from a standard pier cap.
13- Side segment on pier in rotation.

LA PRÉFABRICATION DES CHEVÊTRES

Afin de réaliser les deux géométries de chevêtre (pile culée, 424 m³ et courant et fixe, 370 m³), deux coffrages ont été prévus. L'utilisation du nombre minimum de tiges de reprise a conduit à augmenter le poids du coffrage, à créer de

solides ceintures de reprise des efforts et à prévoir, sur les passerelles, des consoles de capacité importante pour reprendre le poids de l'ensemble et les efforts appliqués durant le bétonnage (figure 12).

L'ASSEMBLAGE DES MVSP

Les 7 voussoirs composant chaque Méga VSP arrivent de nuit par convoi exceptionnel sur des fardiers spécifiquement conçus pour le chantier. Ces voussoirs sont ensuite pris en charge par un chariot, puis déplacés jusqu'à la zone d'assemblage.

Compte tenu de la dimension de la zone d'assemblage, de l'encombrement des fardiers et de leurs rayons de giration très importants, les voussoirs sont livrés perpendiculairement à la zone d'assemblage.

Une table tournante a donc été réalisée pour permettre la rotation à 90° des pièces livrées (figure 13).

Comme pour un fléau classique, l'assemblage débute par le voussoir sur pile auquel les 2 voussoirs sur pile latéraux sont ajoutés.

L'opération est répétée avec l'assemblage de part et d'autre des 2 paires de voussoirs courants (2 voussoirs V1, puis 2 voussoirs V2).

Six assemblages sont ainsi nécessaires pour réaliser un Méga VSP avant sa prise en charge pour la pose.

Le processus d'assemblage de deux voussoirs se décompose ainsi :

- Nettoyage du parement à encoller.
- Encollage : application d'une résine époxyde sur le parement d'un des deux voussoirs à assembler.
- Déplacement du voussoir avec le chariot et réglage, puis mise au contact avec l'autre voussoir. Afin d'assurer un bon assemblage, chaque voussoir est équipé d'indentation. Après polymérisation, la colle permet de réaliser l'étanchéité entre les 2 voussoirs.
- Brélage horizontal : la mise en tension de barres provisoires de précontrainte permet d'assurer une compression suffisante du joint pendant sa prise.
- Précontrainte : pour les phases définitives, 2 câbles de précontrainte de fléau (31 torons T15S) sont enfilés au travers des gaines continues du hourdis supérieur, puis mis en tension au travers de chaque paire de voussoirs courants (V1 et V2) (figure 14).



© VIADUC LITTORAL
13



14 © VIADUC LITTORAL

ENJEUX DE LA ZONE VIS-À-VIS DU PROJET

Les dimensions et le poids des éléments, les emprises limitées à l'intérieur du port au droit du quai de chargement dédié, ont pour conséquence la faible capacité de stockage de l'aire de préfabrication. En termes de planning, une pile complète est réalisée en 35 à 40 jours (20 jours pour l'embase et 15 à 20 jours pour la tête de pile). Avec deux lignes de fabrication et des positions successives sur celles-ci, une pile complète sort ainsi du site de préfabrication tous les 10 jours. Le Méga VSP est assemblé en environ 10 jours également. Les aléas rencontrés par les travaux terrestres sont différents, et souvent moins importants, que ceux rencontrés par les travaux maritimes (houles, intempéries). De ce fait, l'enjeu majeur du site de préfabrication est d'assurer son agilité sur les cadences

de réalisation des pièces pour s'adapter à la cadence des travaux maritimes. Pour ne pas risquer d'arrêter le projet, le site doit fournir en continu les différents éléments à la barge de pose, tout en maîtrisant sa propre production pour ne pas subir d'arrêt de travail et maîtriser les coûts. □

**14- Atelier
d'assemblage
du MVSP.**

**14- Workshop
assembly of
mega-segment
on pier.**

PRINCIPALES QUANTITÉS

NOMBRE DE PILES : 48

- 6 piles culées
- 7 piles fixes
- 35 piles courantes

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Région Réunion

MAÎTRE D'ŒUVRE : Egis

GROUPEMENT D'ENTREPRISES DU MARCHÉ VIADUC :
Vinci Construction Grands Projets (mandataire), Bouygues Travaux Publics, Dodin Campenon Bernard, Demathieu Bard Construction

SOUS-TRAITANT ARMATURES : Samt

SOUS-TRAITANT PROTECTION CATHODIQUE : Freyssinet

SYSTÈME DE RIPAGE : Hebetec

COFFRAGES : coffrage & équipement et Clrm

	Béton (m ³)	Acier (t)
Embase	67 700	12 820
Tête de pile	31 700	8 120
Clavage	1 170	280
Total	99 400	20 940

ABSTRACT

VIADUCT ON THE NEW COASTAL ROAD ("NRL") ON REUNION ISLAND: PREFABRICATION OF THE 48 PIERS AND ASSEMBLY OF MEGA-SEGMENTS ON PIERS

EMLINE ESPALIEU, DODIN CAMPENON BERNARD- ANTOINE AFETTOUCHE, BOUYGUES TP - ROMAIN LEONARD, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION

The New Coastal Road (NRL) project on Reunion Island includes a sea viaduct 5400 metres long. All the various bridge elements are prefabricated onshore. A dedicated prefabrication plant executes the 48 viaduct piers and assembles the first deck sections consisting of 7 segments: the mega-segments on piers. The construction methods are described in detail to illustrate the work expertise. The design of the production line on a small site, the pier production rates and the movement of massive parts weighing almost 4500 tonnes are technical challenges for this prefabrication area. □

VIADUCTO DE LA NUEVA CARRETERA DEL LITORAL EN LA REUNIÓN: PREFABRICACIÓN DE LOS 48 PILOTES Y ENSAMBLAJE DE LAS MEGA DOVELAS SOBRE PILOTE

EMLINE ESPALIEU, DODIN CAMPENON BERNARD- ANTOINE AFETTOUCHE, BOUYGUES TP - ROMAIN LEONARD, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION

La obra de la Nueva Carretera del Litoral en La Reunión incluye un viaducto sobre el mar de 5.400 m. La totalidad de los distintos elementos de la obra han sido prefabricados en tierra. Así, una planta de prefabricación específica permite realizar los 48 pilotes del viaducto y ensamblar las primeras secciones de tablero, compuestas de 7 dovelas: las mega dovelas sobre pilote. Detallamos los métodos de ejecución para ilustrar la excelencia de las obras. El diseño de la cadena de producción en un emplazamiento restringido, las cadencias de producción de los pilotes y el desplazamiento de piezas macizas de unas 4.500 t constituyen los desafíos técnicos de esta zona de prefabricación. □



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



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 - 8 rue Louis Armand - CS 71201 - 75738 Paris Cedex 15

PRÉSERVONS L'AVENIR



Construction de deux murs latéraux de 32m de hauteur en remblai renforcé parement minéral à l'entrée de la mine d'or du Tasiast.

Dans une volonté de concevoir des solutions de soutènement durables et écoresponsables, Maccaferri apporte son expérience et sa capacité d'innovation dans la réalisation d'ouvrages de haute technicité et d'une exceptionnelle longévité.

Ses solutions sont pensées pour protéger les populations et les infrastructures autour d'une double préoccupation : s'intégrer au cadre naturel et réduire l'impact carbone du site.

Une réponse adaptée à la dimension financière et écologique de chaque projet.

MACCAFERRI

Mine du Tasiast, Mauritanie

Terramesh® system - 2200 m²
Géogrilles Paralink® - 45 000 m²

www.maccaferri.com/fr