

# TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

**SPECIAL LGV. LVG SEA** : CONTEXTE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE - VIADUCS DE LA DORDOGNE ET DE LA VIENNE - ESTACADE DE LA VIRVEE - SAUTS-DE-MOUTON - TRANCHEE DE VEIGNE. **LVG TANGER/KENITRA** : VIADUC SUR L'OUED SEBOU. **LVG BPL** : CONCEPTION - TERRASSEMENTS - OUVRAGES D'ART - DEMARCHE ENVIRONNEMENTALE - GRAVE-BITUME SOUS BALLAST - **LVG CNM** : CONCEPTION - OUVRAGES D'ART - VIADUCS DU VISTRE/DE LA SARELLE ET DU LEZ/DE LA LIRONDE - TRANCHEE DE MANDUEL - GESTION DE L'ALEA KARSTIQUE

N°912 JANVIER/FÉVRIER 2015



LGV SEA - RACCORDEMENTS DE FONTAINE-LE-COMTE  
© P. LE DOARÉ



# CONSTRUIRE L'AVENIR ENSEMBLE

EXPERTISE - INNOVATION - NETWORKING

20-25 Avril 2015

Paris-Nord Villepinte - France

**INTERMAT**  
*Paris*

Exposition Internationale de Matériels et Techniques  
pour les Industries de la Construction et des Matériaux.

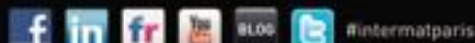


**Votre badge gratuit sur** | **code**  
[www.intermatconstruction.com](http://www.intermatconstruction.com) | **PROMOFR**

**INFOLIGNE :**  
**+33 (0)1 43 84 83 86**

un événement  
**comeXposium**  
The World in One

INTERMAT Paris  
70 avenue du Général de Gaulle  
92058 Paris La Défense Cedex - FRANCE  
E-mail : [contact@intermatconstruction.com](mailto:contact@intermatconstruction.com)



**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**  
Hélène Abel (Ingérop), David  
Berthier (Vinci Construction France),  
Sami Bounatirou (Bouygues TP),  
Jean-Bernard Detry (Setec), Philippe  
Gotteland (Fnfp), Jean-Christophe  
Goux-Reverchon (Fnfp), Laurent  
Guilbaud (Saipem), Ziad Hajar  
(Eiffage TP), Florent Imbert  
(Razel-Bec), Claude Le Quéré (Egis),  
Stéphane Monleau (Soletanche Bachy),  
Jacques Robert (Arcadis), Claude  
Servant (Eiffage TP), Philippe Vion  
(Systra), Michel Morgenthaler (Fnfp)**Pilotage de ce numéro spécial**  
Claude Le Quéré (Egis)**A participé à la rédaction**  
Marc Montagnon**Service Abonnement et Vente**  
Com et Com  
Service Abonnement TRAVAUX  
Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot  
92350 Le Plessis-Robinson  
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22  
Fax +33 (0)1 40 94 22 32  
revue-travaux@cometcom.frFrance (9 numéros) : 190 € TTC  
International (9 numéros) : 240 €  
Enseignants (9 numéros) : 75 €  
Étudiants (9 numéros) : 50 €  
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)  
Multi-abonnement : prix dégressifs  
(nous consulter)**Publicité**  
Rive Média  
2, rue du Roule - 75001 Paris  
Tél. 01 42 21 88 02 - Fax 01 42 21 88 44  
contact@rive-media.fr  
www.rive-media.fr**Directeurs de clientèle**  
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04  
b.cosson@rive-media.fr  
Carine Reininger - LD 01 42 21 89 05  
c.reininger@rive-media.fr**Site internet :** www.revue-travaux.com**Édition déléguée**  
Com'1 évidence  
Siège :  
101, avenue des Champs-Élysées  
75008 PARIS  
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52  
revuetravaux@com1evidence.comLa revue Travaux s'attache, pour l'information  
de ses lecteurs, à permettre l'expression de  
toutes les opinions scientifiques et techniques.  
Mais les articles sont publiés sous la  
responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur  
se réserve le droit de refuser toute insertion,  
jugée contraire aux intérêts de la publication.Tous droits de reproduction, adaptation, totale  
ou partielle, France et étranger, sous quelque  
forme que ce soit, sont expressément réservés  
(copyright by Travaux). Ouvrage protégé ;  
photocopie interdite, même partielle  
(loi du 11 mars 1957), qui constituerait  
contrefaçon (code pénal, article 425).Editions Science et Industrie SAS  
9, rue de Berri - 75008 Paris  
Commission paritaire n°0116 T 80259  
ISSN 0041-1906**2015**

© DR

Cet été, la loi portant réforme ferroviaire a été définitivement votée. C'est une loi importante pour l'économie française car elle donne un avenir au ferroviaire en France. Elle marque un tournant pour notre réseau et pour tous les clients de SNCF Réseau.

Cette réforme va tout d'abord nous aider à poursuivre la mise en œuvre de notre priorité absolue qu'est la maintenance et la modernisation du réseau existant. Cette priorité stratégique de maintenance de l'infrastructure nous a été rappelée récemment par le Ministre des transports Alain Vidalies. Pour ce faire, les installations sont surveillées, entretenues et renouvelées et modernisées par les équipes de SNCF Réseau

Le réseau ferré français est entré dans une nouvelle étape marquante de son histoire. Après sa création puis son déploiement sur le territoire, le saut technologique incarné par les LGV, c'est désormais sa modernisation qui constitue aujourd'hui le défi de SNCF Réseau. Cette réforme va nous aider à atteindre l'excellence pour tout le réseau.

## ANNÉE DU RÉSEAU STRUCTURANT

Après une première étape d'investissement centrée principalement sur le réseau régional depuis 2008, nous rénovons désormais les lignes structurantes. Avec une priorité assumée pour l'Île-de-France et ses 3 millions de voyageurs du quotidien, c'est un effort sans précédent qui se traduit par plus de 1 500 chantiers par an, 1 000 km de voies renouvelées et plus de 2,5 milliards d'euros investis pour améliorer la qualité de notre service. Nous allons également intégrer les nouvelles technologies pour rendre le réseau plus intelligent et plus performant sur tous les plans : sécurité d'abord, fiabilité, industriel et économique.

La réunion de nos ingénieurs au sein d'une même structure va nous permettre de réaliser un saut technologique majeur et de renouveler nos méthodes de maintenance, nos équipements, nos outils et notre organisation pour faire face à la croissance des trafics et pour répondre aux besoins de nos clients. Elle va nous permettre de stopper puis d'inverser le vieillissement de notre réseau, de mettre en œuvre une politique industrielle de long terme, d'améliorer significativement nos performances et de réaliser des gains de productivité substantiels.

La réussite de cette réforme repose sur le plein engagement de tous les collaborateurs du groupe public unifié SNCF désormais rassemblés au sein d'une même famille ferroviaire. La sécurité des circulations ferroviaires et l'amélioration de la qualité de service sont bien au cœur de nos préoccupations quotidiennes.

**JACQUES RAPOPORT**  
PRÉSIDENT DU DIRECTOIRE DÉLÉGUÉ DE LA SNCF  
PRÉSIDENT DE SNCF RÉSEAULISTE DES ANNONCEURS : INTERMAT, 2<sup>e</sup> DE COUVERTURE - CNETP, P.89 - SMABTP, 4<sup>e</sup> DE COUVERTURE





# SPÉCIAL LGV



LGV SEA - VIADUC DE LA DORDOGNE © LILIAN MAROLLEAU POUR LISSEA







**004 ALBUM**

**006 ENTRETIEN AVEC ERIK LELEU**  
LGV SEA : LES RAILS DE L'EMPLOI

**010 INRAP :**  
100000 ANS SOUS LES RAILS DE LA LGV SEA

**016 INFORMATIONS CLÉS SUR LES 4 LIGNES NOUVELLES À GRANDE VITESSE**

### LGV SEA

**018 CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE**

**024 LES MOUVEMENTS DES TERRES**

**030 VIADUC DE LA DORDOGNE**

**036 L'ESTACADE DU MARAIS DE LA VIRVÉE**

**044 LE TABLIER DU VIADUC DE LA VIENNE**

**050 SAUTS-DE-MOUTON**

**056 TRANCHÉE DE VEIGNÉ**

### LGV TANGER-KENITRA

**062 LE VIADUC SUR L'OUED SEBOU**

### LGV BPL

**068 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET**

**072 LA CONCEPTION D'UNE LGV**

**076 LES TERRASSEMENTS OUVERT LA VOIE**

**082 LES OUVRAGES D'ART**

**090 DÉMARCHE ENVIRONNEMENTALE « ÉVITER, RÉDUIRE ET COMPENSER »**

**096 LA SOLUTION GRAVE-BITUME SOUS BALLAST**

### LGV CNM

**102 UNE CONCEPTION ÉTROITEMENT LIÉE À LA MIXITÉ ET AU CONTEXTE HYDRAULIQUE**

**108 LES OUVRAGES D'ART COURANTS (OAC)**

**114 LE VIADUC DU VISTRE ET DE LA SARELLE**

**120 LE VIADUC DU LEZ ET DE LA LIRONDE**

**126 LA TRANCHÉE COUVERTE DE MANDUEL**

**132 LA GESTION CONCERTÉE DE L'ALÉA KARSTIQUE**









## ESTACADES ET SAUTS- DE-MOUTON

**LES OUVRAGES** de l'estacade d'Ambarès raccordent la LGV SEA à la ligne classique Paris-Bordeaux. Côté Paris, une première estacade à 6 travées, longue de 135 m, permet à la voie de s'élever au-dessus du niveau de celle qu'elle va franchir. Un saut de mouton de 114 m lui permet ensuite de franchir la voie V2 de la ligne classique. Côté Bordeaux, une seconde estacade à 9 travées, longue de 202,5 m, lui permet de rejoindre le niveau de la voie V1 de la ligne classique pour s'y raccorder. Les estacades ont été préférées à des remblais en raison de la compressibilité du sol. En plus, 7 autres sauts-de-mouton ont été construits sur le tracé, avec maintien de circulation des trains sur la ligne classique. Sur la petite photo : le SDM 0382 comportant deux cadres latéraux additionnels pour franchissement de voies communales.

(voir article page 50).



© SGI



# LGV TOURS-BORDEAUX : LES RAILS DE L'EMPLOI

CHANTIER TITANESQUE DE PLUS DE 300 KM RÉALISÉ DANS LE DÉLAI RECORD DE 6 ANS, DE LA PHASE DE CONCERTATION À LA MISE EN SERVICE, LA RÉALISATION DE LA LGV SUD EUROPE ATLANTIQUE RELIANT TOURS À BORDEAUX EST AUSSI UN EXCEPTIONNEL LEVIER POUR L'EMPLOI SUR LES TERRITOIRES QUE LA LIGNE TRAVERSE. POUR SA CONSTRUCTION, COSEA A RECRUTÉ PLUS DE 1 300 PERSONNES, DANS LES SIX DÉPARTEMENTS CONCERNÉS (INDRE-ET-LOIRE, VIENNE, DEUX-SÈVRES, CHARENTE, CHARENTE MARITIME, GIRONDE). **ENTRETIEN AVEC ERIK LELEU, DRH DE COSEA.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



© MARC MONTAGNON

CHEF D'ORCHESTRE D'UN RECRUTEMENT QUI AVAIT ÉTÉ PRÉPARÉ DE LONGUE DATE, ERIK LELEU, DRH DE COSEA, NOUS EXPLIQUE COMMENT CE RECRUTEMENT A ÉTÉ ORGANISÉ POUR LES TRAVAUX DE TERRASSEMENT ET DE GÉNIE CIVIL MAIS AUSSI COMMENT EST ASSURÉE LA RECONVERSION DES PERSONNELS POUR LES TRAVAUX FERROVIAIRES ET MÊME, AU-DELÀ, APRÈS LA FIN DES TRAVAUX.

**En phase initiale de travaux, comment avez-vous recruté les personnels complémentaires aux effectifs propres de Cosea<sup>(1)</sup> ?**

Les recrutements pour les travaux qui ont débuté à l'été 2012 ont été préparés dès la fin de l'année 2010, en lien étroit avec l'État, Pôle Emploi, les Collectivités, au premier rang desquelles le Conseil régional de Poitou-Charentes, territoire le plus concerné par le chantier. Il aura surtout été accompagné d'un vaste plan de formation qui constitue une première pour une opération de cette envergure dans

le délai extrêmement serré dont nous disposons. Il nous fallait constituer une équipe qui permette d'accéder à tout le « sourcing » à partir du moment où l'on a la volonté d'intégrer un maximum de personnes du territoire. Au plus fort de son activité, le chantier a employé 8 500 personnes dont 6 500 provenant soit de Vinci, soit de ses filiales et de ses sous-traitants. Les 2000 manquant à l'appel ont été recrutées et formées sur le territoire. C'est l'une des grandes nouveautés sur ce projet. À la différence des autres très grands chantiers où les entreprises opération-

© PASCAL LE DOARÉ



2

© ALAIN MONTAUFIER



3



1- Erik Leleu, DRH de COSEA.

2- Sur les 1300 personnes embauchées, toutes catégories confondues, 200 sont des femmes.

3- Aujourd'hui que la phase de terrassement est quasiment terminée, des réunions sont organisées pour promouvoir les métiers du ferroviaire.

4- Au plus fort de son activité, le chantier a employé 8 500 personnes.

5- Par leur simple présence, les femmes parviennent à changer le comportement de tout un groupe de compagnons.

## ERIK LELEU EN BREF : « HUMAN INTEREST »

Titulaire d'une maîtrise, puis une agrégation d'histoire et géographie, Erik Leleu quitte l'enseignement après trois ans. Il rentre alors dans la grande distribution en tant que responsable de département « caisse » pendant un an puis responsable des relations sociales dans le même hypermarché.

Il quitte cet emploi en 1986 pour rejoindre une PME du BTP du Nord-Pas-de-Calais, la plus importante dans ce département. Après le dépôt de bilan de cette entreprise et son rachat par Dumez, il reste dans le Nord de 1987 à fin 1991.

En 1992, il est nommé DRH de Dumez France au siège de Nanterre (92), où il conserve cette fonction jusqu'en 1998.

En 1998, Dumez se fond dans GTM et Erik Leleu devient DRH du nouvel ensemble.

C'est le poste qu'il occupe en 2000 quand GTM rejoint le groupe Vinci.

Il est DRH de GTM Construction, désormais intégré à Vinci, de 2000 à 2004, avant de rejoindre Cofiroute en tant que DRH entre 2004 et 2006.

Lors du rachat d'ASF par Vinci en 2006, il est nommé DRH d'ASF ainsi que du pôle « concessions » de Vinci.

Puis, en 2007, il devient DRH du groupe Vinci, poste qu'il occupera jusqu'en 2009.

Après un cours passage chez Vinci Park, il est nommé DRH du projet LGV SEA Tours - Bordeaux, poste qu'il occupe actuellement.

Joueur de rugby pendant vingt ans, il pratique son métier avec un esprit de sportif. Les valeurs qu'il défend, sur le terrain comme dans l'entreprise : " Le respect de l'autre, le respect des règles, la convivialité et la loyauté. "

Sur ces 1300 personnes directement recrutées en CDIC<sup>®</sup>, 1000 ont ainsi été formées.

Il nous fallait nous organiser pour les former et les recruter dans un laps de temps très court : les travaux démarrent pratiquement à l'été 2012, nous disposons de 8 mois.

C'est ainsi que nous avons installé neuf plates-formes de formation, dont cinq pour les conducteurs d'engins, au plus près de la trace, en nous appuyant sur les organismes de formation proches, lorsqu'ils existaient, et en adaptant leurs installations à la conduite d'engins mais aussi en créant de toutes pièces six plates-formes spécifiques au génie civil, en particulier pour la conduite d'engins, entre Tours et Bordeaux avec tous les équipements nécessaires : plusieurs hectares de pistes ont ainsi été aménagés permettant de se familiariser avec toutes les manœuvres liées à la conduite d'un engin de terrassement. À ceci s'ajoutait la création de quatre plates-formes de formation au génie civil.

L'objectif était de réaliser notre recrutement avec une continuité « domicile, lieu de formation, lieu de travail ».

Nos neuf plates-formes étaient ainsi réparties : au sud de Tours, entre Châtelleraut et Poitiers, au sud de Poitiers, à hauteur d'Angoulême et au nord de Bordeaux, c'est-à-dire sur toute la longueur et à proximité du chantier. Le vivier dans lequel nous allions piocher était constitué essentiellement de demandeurs d'emploi dont beaucoup étaient bénéficiaires du RSA.

Le premier écueil du retour à l'emploi est la mobilité : sans mobilité, il n'est pas possible de revenir à l'emploi.

Nous avons respecté le critère de proximité grâce à quoi, avec toutes les personnes que nous avons recrutées et formées, nous avons obtenu des taux de réussite qui pulvérisent les statistiques nationales. ▷

© PASCAL LE DOARÉ

4



nelles font venir des intérimaires en provenance aussi bien de France que de l'étranger, sur celui de la LGV SEA il a été choisi d'associer, au niveau de l'emploi, les départements traversés. Ceci nous a amené à mettre au point dès 2010 une convention entre Cosea, le Conseil régional et la Préfecture de Poitou-Charentes ainsi que Pôle Emploi définissant clairement un processus de recrutement réalisé essentiellement localement. 2 500 entretiens individuels ont ainsi été réalisés avec Pôle Emploi afin de constituer un vivier de près de 2 000 personnes dans lequel on est venu piocher pour recruter les 1300 collaborateurs que nous allions engager et former.

© PASCAL LE DOARÉ

5



Pour 100 personnes appelées et formées, nous avons à peine 10% d'échec alors que, la plupart du temps, c'est le contraire qui est observé.

En huit mois, nous avons donc formé et recruté 1 300 personnes qui étaient destinées aux métiers d'un chantier de Travaux Publics : conduite d'engins ou génie civil et terrassement.

Ceci a représenté 300 000 heures de formation. Cet effectif est présent sur les différents lots du chantier depuis pratiquement 24 mois.

### Avaient-ils déjà une formation aux métiers des Travaux Publics ?

Quasiment aucun d'entre eux n'avait jamais travaillé sur un chantier. Leurs origines étaient extrêmement variées : maraîchers, commerciaux, boulangers, pâtisseries, agriculteurs...

Des demandeurs d'emploi du type de ceux que nous avons recrutés, il en existe énormément avec les problèmes d'insertion consécutifs aux clauses retenues pour les marchés publics : chômeur de longue durée, jeune sans qualification, plus de 50 ans, personnel handicapé.

Nous n'avons jamais parlé de cette situation. Les chefs de chantier ne l'ont jamais su et tout s'est parfaitement bien passé.

Parmi les personnes que nous avons recrutées, entre 60 et 70% relevaient de ces critères d'insertion, plusieurs centaines étaient bénéficiaires de minimas sociaux.

### Dans un milieu que l'on considère comme plutôt « viril », quelle est la place des femmes dans ce recrutement ?

Sur les 1 300 personnes embauchées, toutes catégories confondues, 200 sont des femmes : aussi bien à des postes d'ingénieur ou de cadre, que d'agent de maîtrise. Nous comptons également une centaine de conductrices d'engins.

## UN CHANTIER D'INSERTION

**La construction de la LGV SEA est actuellement le plus grand chantier d'insertion en Europe :**

- **1 300 personnes en insertion,**
- **dont 500 bénéficiaires de minimas sociaux,**
- **3 millions d'heures de travail d'insertion.**

## D'UNE PME À UNE TRÈS GRANDE ENTREPRISE

**L'examen de la courbe de l'évolution des effectifs sur le chantier Cosea met en évidence la complexité de leur gestion au fil des mois :**

- **50 : été 2010**
- **500 : été 2011**
- **5 000 : été 2012**
- **8 500 : été 2013 à été 2014**
- **500 : été 2016**

Recruter des collaboratrices ne fut toutefois pas chose aisée. Lorsque nous avons informé les prescripteurs de l'emploi de notre volonté d'embaucher des femmes, nous sommes restés deux mois sans retour. Il a fallu apporter la preuve par l'exemple, dans les sessions de formation.

Les machines d'aujourd'hui sont suffisamment ergonomiques pour être conduites par des femmes. À la grande satisfaction des chefs de chantier.

Les femmes apportent une valeur ajoutée à plusieurs niveaux. Tout d'abord, elles font preuve d'une rigueur et d'une précision supplémentaires.

Sur le maniement d'engins, elles sont également plus précautionneuses et minutieuses que leurs collègues masculins. Ensuite, un vrai plus se ressent au niveau de l'ambiance générale.

Par leur simple présence, elles parviennent à changer le comportement de tout un groupe de compagnons.

On s'aperçoit d'ailleurs que ces derniers y sont sensibles et sont très fiers de collaborer au quotidien avec des femmes. La traditionnelle posture machiste n'est plus de rigueur.

### Le terrassement et le génie civil du chantier touche à sa fin. C'est donc l'heure de la reconversion pour les quelques 1 300 personnes recrutées dans les six départements traversés. Comment cette reconversion est-elle organisée ?

En décembre dernier, 600 personnes étaient déjà sorties du projet entre Tours et Bordeaux.

Aujourd'hui que la phase de terrassement et génie civil est quasiment achevée et que nous entrons dans la phase du ferroviaire, nous avons organisé fin 2013 des réunions pour promouvoir les métiers du ferroviaire. Plusieurs centaines de ceux qui y ont participé nous ont indiqué qu'ils étaient intéressés.

À l'issue de leur tâche pour les travaux d'infrastructure, ils ont été licenciés puisqu'il y a un changement d'employeur, ils se sont réinscrits à Pôle Emploi pour être formés aux métiers du ferroviaire et ils poursuivent ainsi leur activité avec un deuxième métier entre les mains, sous l'égide du groupement « superstructure » de Cosea.

Les douze premiers stagiaires d'une longue lignée sont sortis, en juillet 2014, de la première session de formation/reconversion des travailleurs de la « trace ».

Ils ont passé sept semaines sur la base « travaux ferroviaires » de Villognon, au nord d'Angoulême. Il s'agit bien de « pionniers » qui ont, pour la plupart, découvert l'univers des TP avec le lancement du chantier et qui y ont trouvé une seconde opportunité. C'est ce que j'appelle le « redéploiement » quand, sur un gros chantier de ce type, on parle de démobilisation à la fin des contrats. Et c'est ce qui

**6- Pour la construction de la LGV SEA, Cosea a recruté et formé 1 300 personnes.**

**7- Au niveau du recrutement, nous avons des taux de réussite qui explosent les statistiques nationales habituelles.**

**8- L'une des nouveautés du projet : les départements traversés ont été associés au niveau de l'emploi.**

**9- Le pari : montrer que, dans les Travaux Publics, l'ascenseur social fonctionne encore.**

© PASCAL LE DOARÉ

6



© PASCAL LE DOARÉ

7





permet à 400 salariés en fin de CDI Chantier de bénéficier d'un nouveau contrat. Nous faisons la même chose sur le ferroviaire que sur le terrassement. Nous avons une commande de 400 personnes pour les rails et les caténaires. Elles existent parmi celles qui ont fait le génie civil et le terrassement. Nous nous sommes dits « formons-les ». C'est un continuum.

### Avez-vous mis en place un type de recrutement particulier pour la reconversion des « terrassiers » ?

Ils ont tous été recrutés selon le même processus que pour la phase initiale de travaux. Puis, à l'issue de leur semaine de stage, de période d'application en entreprise, ils ont été embauchés par leurs nouveaux employeurs. Ainsi, les premiers agents de parc caténaires ont-ils signé leur contrat, un CDI Chantier, chez TSO Caténaires ou ETF.

Depuis l'été 2014, plus de 150 stagiaires ont été formés sur la base travaux de Villognon. Les premiers ont commencé en juillet dernier à monter les poteaux caténaires sur le parc de Villognon. À la même date, les premières équipes de poseurs de rails sont entrées en formation. Après sept semaines de théorie et de pratique, les poseurs ont commencé à dérouler la voie en direction du nord, jusqu'à la jonction avec leurs homologues de Nouâtre, en Indre-et-Loire, avant de repiquer vers le sud.

À la mi-août, les premières équipes de poseurs de poteaux caténaires ont à leur tour fait leur rentrée scolaire. Les dernières sessions ont débuté le 15 décembre 2014. Elles étaient constituées de poseurs de caténaires, cette fois, en mode ferroviaire, puisque les rails seront, eux aussi, déjà posés. Il s'agira de dérouler et de régler les derniers câbles électriques avant de livrer, en 2016, la voie aux essayeurs.

## LGV SEA : LES 5 PHASES

- **CONCERTATION ÉTUDES** : 2011 / début 2012
- **INFRASTRUCTURES** : 2012 / début 2016
- **ÉQUIPEMENTS FERROVIAIRES** : mi 2014 / mi 2016
- **ESSAIS** : mi 2016 / 2017
- **MISE EN SERVICE** : juillet 2017

### Chef de file des recrutements en 2011, Pôle Emploi Poitou-Charentes se retrouve-t-il également en première ligne pour le reclassement des salariés dont les CDI Chantier arrivent à échéance ?

L'accompagnement des personnels dont les contrats avec Cosea s'achèvent s'inscrit dans la continuité d'un partenariat public-privé original que beaucoup considèrent comme exemplaire. L'implantation d'une antenne permanente de l'agence Pôle Emploi Poitou-Charentes au siège de Cosea, à Poitiers, en est le symbole.

L'équipe dite « LGV » de Pôle Emploi, animée par Patricia Carli et Pascale Mahé, a pris ses quartiers dans les locaux mêmes de l'entreprise. Autant d'intérêts, autant de moyens, un dispositif de pilotage partagé et un guichet unique, c'est une première.

Après avoir évolué pendant le chantier, cette équipe compte aujourd'hui six conseillers qui travaillent ainsi au plus près de nos équipes et des problématiques d'emploi du chantier.

Ils sont dédiés à 100% à cette activité et cette équipe restera dans nos locaux jusqu'en 2015.

Leur attention est tout entière mobilisée, dans l'immédiat, pour l'accompagnement des personnes qui sont en fin de contrat. L'objectif est que tout le monde retrouve un emploi : dans le périmètre de la ligne ou à l'extérieur,

en valorisant les acquis de l'expérience, voire en aidant à la création d'une entreprise. Il est possible de transposer vers les métiers du bâtiment les savoir-faire mis en œuvre lors des travaux de terrassement. Il existe des possibilités d'emploi pour la conduite des matériels agricoles, des transferts sont possibles pour la conduite de bus. Le pas n'est pas si grand, non plus, pour les travaux agricoles, forestiers et ruraux.

Les entrepreneurs des Territoires de Poitou-Charentes, qui représentent 574 entreprises dont 255 emploient au moins un salarié, assurent des prestations pour le compte des agriculteurs, des propriétaires et exploitants forestiers, des collectivités et établissements publics, des gestionnaires d'espaces naturels.

Toutes ont reçu des fiches répertoriant les métiers des salariés qui sont arrivés en fin de contrat chez Cosea et ceux qui leur correspondent dans leur domaine d'activité. Ces documents reprennent également les dispositifs d'aide et de formation qui peuvent accompagner d'éventuels recrutements. Nous avons déjà de nombreux exemples de reconversion réussie dans le BTP ou dans d'autres secteurs.

Pour en citer quelques uns : un conducteur d'engin, précédemment chauffeur-livreur, manutentionnaire et employé de dépôt de presse, travaille désormais sur le site de compactage d'un centre d'enfouissement de

déchets ; un conducteur de tombereau s'est orienté vers le métier de plombier-chauffagiste ; un conducteur de compacteur a fondé son entreprise de maçonnerie-paysagiste ; un ouvrier agricole est désormais conducteur d'engins dans une entreprise de travail intérimaire.

Le maître-mot de nous tous, au sein de Cosea comme de nos partenaires, est de fédérer tous les acteurs susceptibles de faciliter la reconversion des salariés.

### Au delà du chantier qui s'achève d'ici deux ans, quel est votre enjeu en tant que DRH ?

L'enjeu, c'est d'apporter aux équipes recrutées en CDIC davantage que 18 mois de répit supplémentaire, à travers un nouveau contrat de chantier. C'est de leur apprendre un nouveau métier. C'est de leur apporter un bagage complémentaire.

Ceux qui sont passés par le chantier de terrassement et de génie civil et ont appris notamment la conduite d'engins savent qu'il y aura d'autres chantiers de terrassement ailleurs, qu'il y aura encore des routes à construire ou à entretenir.

Ceux qui auront appris à monter les caténaires, à installer les câbles et à poser les voies entre Tours et Bordeaux savent qu'il y aura également des chantiers à venir dans le domaine ferroviaire, comme par exemple, l'électrification de la voie Niort-Saintes.

Si le problème de mobilité géographique constitue souvent un handicap, il faut aussi penser à la mobilité professionnelle.

C'est mon pari : montrer que, dans les Travaux Publics, l'ascenseur social fonctionne encore. □

1- **Cosea** : groupement d'entreprises piloté par Vinci, maître d'œuvre et assistant à la maîtrise d'ouvrage, en charge de la conception et de la construction de la ligne.

2- **CDIC** : Contrat à Durée Indéterminée de Chantier.

© PASCAL LE DOARÉ

8



© PASCAL LE DOARÉ

9





1 © Inrap

# INRAP 100 000 ANS SOUS LES RAILS DE LA LGV SEA

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

LES GRANDS AMÉNAGEMENTS DU TERRITOIRE SONT À L'ORIGINE DE DÉCOUVERTES ARCHÉOLOGIQUES NOMBREUSES ET FRUCTUEUSES. LA LÉGISLATION ACTUELLE RELATIVE À L'ARCHÉOLOGIE PRÉVENTIVE PERMET DE PRENDRE EN COMPTE CES AMÉNAGEMENTS AVANT LES TRAVAUX. TRAVERSANT TROIS RÉGIONS, LA LGV SUD-EUROPE-ATLANTIQUE RELIANT TOURS À BORDEAUX, S'ÉTEND SUR 302 KM DE VOIES NOUVELLES POUR PRÈS DE 3 500 HECTARES DE TRAVAUX, SUR LESQUELS DES DIAGNOSTICS ONT ÉTÉ ENGAGÉS À LA DEMANDE DE RFF, PUIS DU CONCESSIONNAIRE LISEA. LE CHANTIER A OFFERT À L'INRAP (INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES ARCHÉOLOGIQUES PRÉVENTIVES) UNE NOUVELLE OCCASION DE METTRE EN ÉVIDENCE SON SAVOIR-FAIRE, TOUT COMME IL L'AVAIT DÉJÀ FAIT SUR LE CHANTIER DE LA LGV EST EUROPÉENNE.

**Isabelle Kerouanton, responsable scientifique de l'Inrap pour la LGV SEA, nous guide dans cette visite du « chantier avant le chantier » et nous explique la nécessité historique de l'archéologie préventive qui permet la prise en compte de l'archéologie dans sa globalité sans bloquer le développement des grands projets d'aménagement du territoire.**

Pour répondre efficacement à l'accroissement d'activité engendré par les diagnostics archéologiques sur la ligne nouvelle, l'Inrap a procédé en premier lieu à des recrutements afin de constituer l'équipe fonctionnelle chargée de cette opération.

Un marché de terrassement a été établi pour assumer un impact total au sol estimé à plus de 3 200 hectares.

**1- Premier coup de pelle sous le regard attentif d'Isabelle Kerouanton.**

Un centre de recherches archéologiques a été spécialement créé et aménagé à l'Isle-d'Espagnac, au nord

d'Angoulême, afin de permettre à plus de 200 archéologues d'intervenir pour un total de près de 45 000 journées de travail.

Les premiers coups de pelle ont été donnés sur la commune de Xambes, en Charente, le 28 septembre 2009. Les derniers diagnostics se sont achevés au début de l'année 2013.

Les fouilles qui leur succèdent ont pris fin en octobre 2013.



Les archéologues de l'Inrap sont intervenus en respectant deux conditions :

- Sur des zones qui sont soumises à un arrêté préfectoral de diagnostic archéologique, prescrit par les Service régionaux de l'Archéologie Centre, Poitou-Charentes et Aquitaine - Drac ;
- Sur des terrains pour lesquels Réseau Ferré de France (puis Cosea) avait obtenu les accords nécessaires auprès des exploitants et/ou propriétaires.

Par ailleurs, les contraintes techniques d'accessibilité - par exemple, le déboisement des terrains avant l'intervention des archéologues - ont également joué sur le planning des interventions.

## L'ARCHÉOLOGIE DANS LE PROJET LGV SEA

En amont de la réalisation de la ligne qui reliera Bordeaux à Paris en près de deux heures, l'Inrap a commencé les premiers diagnostics dès septembre 2009.

Le projet porté par RFF puis repris par un concessionnaire nommé le 31 mars 2010 se développe sur 302 km et traverse du nord au sud trois régions : Centre, Poitou-Charentes, Aquitaine. Il a été scindé en deux « phases-projet » : la section Angoulême - Bordeaux d'environ 122 km (SEA 1) et la section Tours - Angoulême d'environ 181 km (SEA 2).

Les diagnostics archéologiques de ces surfaces, réalisés sous la maîtrise d'ouvrage de l'Inrap, ont duré pratiquement deux ans. Les premières fouilles ont pu débuter dès l'année 2013 en parallèle des diagnostics.

Sur les deux phases SEA 1 et SEA 2 confondues, près de 2 000 hectares sont concernés par les sondages archéologiques.

## DU TERRAIN À L'INTERPRÉTATION DES DONNÉES

Les activités des équipes de l'Inrap forment une chaîne insécable qui comprend trois phases : le diagnostic, la fouille, la phase post-fouille.

Avant que des travaux d'aménagement ne débutent et pour éviter qu'ils soient interrompus, on tente de savoir si le terrain renferme des traces d'occupation humaine : c'est le diagnostic archéologique. Ses objectifs sont de détecter, caractériser, circonscrire et dater d'éventuels vestiges en sondant une partie de la surface du projet d'aménagement et, pour les périodes du Moyen-Âge, en procédant à des recherches en archives. Si aucune fouille n'est ensuite

© MARC MONTAGNON



## L'INRAP EN BREF

**Avec 2 000 collaborateurs et chercheurs, l'Inrap (Institut national de recherches archéologiques préventives) est la plus importante structure de recherche archéologique française et l'une des toutes premières en Europe. Institut national de recherche, il réalise l'essentiel des diagnostics archéologiques et des fouilles en partenariat avec les aménageurs publics et privés : plus de 2 000 diagnostics archéologiques et environ 250 fouilles par an en France métropolitaine et dans les Dom.**

**Ses missions s'étendent à l'exploitation scientifique des résultats et à la diffusion de la connaissance archéologique auprès du public.**

**Fait rare pour un établissement public, les ressources de l'Inrap proviennent pour l'essentiel de ses recettes propres : la redevance d'archéologie préventive (RAP) et la facturation des fouilles.**

**L'institut est organisé en 8 directions interrégionales et 50 centres archéologiques qui lui permettent d'intervenir au plus près de l'aménagement du territoire : Centre-Île-de-France, Grand Est Nord, Grand Est Sud, Grand Ouest, Grand Sud-Ouest, Méditerranée, Nord-Picardie, Rhône-Alpes - Auvergne.**

**Dans la conduite des diagnostics et des fouilles, l'Inrap collabore chaque année avec plus de 2 000 partenaires publics et privés : aménageurs fonciers, sociétés d'autoroutes, réseau ferré de France, exploitants de carrières, conseils régionaux et généraux, entreprises publiques, offices HLM, etc.**

**2- Isabelle Kerouanton, responsable scientifique de l'Inrap pour la LGV SEA.**

réalisée, c'est la seule information qui restera sur l'occupation ainsi décelée. Les travaux sont effectués à partir d'un piquetage, opération qui consiste à matérialiser les emprises à l'intérieur desquelles se dérouleront les diagnostics : à travers champs et forêts, des géomètres déterminent l'emplacement des piquets.

Pour marquer l'emprise du terrain, les géomètres implantent des jalons d'au moins 1,50 m de hauteur, espacés de 30 m maximum en zone boisée et de 100 m en zone découverte, sur l'ensemble de la ligne et les raccordements au réseau ferré existant.

Ce sont donc plus de 16 000 piquets qui ont été disposés sur les territoires traversés.

La fouille proprement dite se concentre sur la partie qui recèle les vestiges les plus importants afin d'en recueillir et d'en analyser l'ensemble des données. Elle permet de comprendre l'évolution du site dans sa globalité.

Après l'achèvement de la fouille, l'exploitation des données scientifiques se

poursuit au centre archéologique et en laboratoire : c'est la phase post-fouille. Elle permet aux archéologues d'exploiter et d'interpréter les données de terrain (plans, coupes, relevés, classement du mobilier, études des vestiges, ...).

Son aboutissement est la rédaction du rapport final d'opération qui peut constituer la base d'une publication scientifique.

## LE MODE OPÉRATOIRE SUR LE TERRAIN

Les diagnostics archéologiques sont réalisés à partir de tranchées creusées à l'aide d'une pelle hydraulique munie d'un godet de curage à lame lisse.

Ces tranchées s'étendent, en longueur, de 20 m à une centaine de mètres, voire plus en fonction de la nature du terrain, avec une largeur d'environ 2 m. Elles représentent entre 5 % et 10 % de la totalité de l'emprise de la ligne nouvelle dans les trois régions traversées.

Les profondeurs des tranchées sont variables et dépendent de la nature du socle géologique et de l'épaisseur des couches sédimentaires : elles mesurent entre 30 et 70 cm de profondeur.

De une à trois pelles hydrauliques interviennent sur le terrain.

Les tranchées ouvertes sont parfois complétées par des ouvertures supplémentaires en cas de mise au jour de vestiges archéologiques tels que mobilier ou traces d'activité humaine. Ponctuellement, des sondages plus profonds peuvent être effectués, qui sont rebouchés dans la journée.

Les tranchées sont refermées le plus rapidement possible, dans un délai maximum de deux semaines, ce qui laisse le temps aux topographes d'effectuer leurs relevés et aux équipes de faire les enregistrements de terrain nécessaires.

Dans tous les cas, et principalement pour tous les terrains agricoles, les terres sont triées à l'ouverture et le rebouchage prend en compte la superposition des couches.

À l'issue de ces travaux, les équipes de l'Inrap établissent un rapport qui est rendu au service prescripteur, en l'occurrence le SRA (service régional de l'Archéologie), qui l'étudie.

En relation avec des commissions interrégionales et en fonction des découvertes, le SRA prescrit ou non des fouilles complémentaires.

Il faut noter à ce sujet que, pour la partie diagnostic, seules interviennent l'Inrap et les collectivités locales. ▶





3



4



5

**3- Décapage préliminaire à une fouille sur le territoire de la commune de Pussigny.**

**4- Sépulture en coffre du Néolithique moyen (4 500 - 3 500 av. J.-C.) dans la fouille de Grouet, sur la commune de Pussigny.**

**5- Près de Pussigny, mise au jour d'un tumulus néolithique avec bermes témoins pour réaliser des coupes stratigraphiques.**

Pour ce qui est des fouilles, les travaux sont soumis à concurrence depuis la loi de 2001 modifiée en 2003 et 2004 sur l'archéologie préventive et peuvent donc être réalisés par des sociétés privées agréées.

Sur le chantier de la SEA, l'Inrap s'est vu confier 50 % des travaux tandis que plusieurs entreprises privées ont réalisé les 50 % restants : c'est ainsi que l'Inrap a effectué 23 fouilles sur un total de 47.

### DÉCOUVERTES ET ENSEIGNEMENTS

Sur le tracé de la ligne SEA, la densité des fouilles a été adaptée à la richesse « archéologique » des régions traversées, essentiellement dans le sud de la région Centre, au passage entre la Vienne et la Creuse, où plus d'une dizaine de fouilles a été réalisée sur quelques kilomètres, autour de Maillé, Pussigny et Marigny-Marmande.

Dans la région Poitou-Charentes, où le contexte topographique est constitué de plateaux, où l'épaisseur végétale est faible, avec une érosion plus marquée et une emprise de la ligne plus étroite, les sites ont été moins nombreux.

Il en a été de même en Aquitaine, où le tracé se situe dans une région très urbanisée dans laquelle il est plus difficile d'intervenir dans des propriétés privées dont les terrains avaient déjà été, de toute façon, très remaniés. Les découvertes ont été rares. Il a malgré tout été réalisé trois fouilles intéressantes sur la Préhistoire, c'est-à-dire le Paléolithique (jusqu'à 10 000 avant J.-C.) en Aquitaine et en Charente Maritime, au sud du tracé juste avant l'entrée en Aquitaine.

### INDRE-ET-LOIRE : DES HALTES DE CHASSEURS-CUEILLEURS...

La traversée du département de l'Indre-et-Loire, dans la région Centre, s'est

avérée la plus riche au niveau archéologique : les 182 sites découverts jalonnent l'ensemble du tracé et couvrent toutes les périodes, de la Préhistoire à nos jours. Lorsque les sites nécessitaient une étude approfondie et ne pouvaient être préservés, des fouilles ont été prescrites. 24 opérations ont ainsi été réalisées sur 52 hectares entre mars 2012 et juillet 2013 par l'Inrap ainsi que par des sociétés privées agréées<sup>(1)</sup>. Par ailleurs, sept zones ont fait l'objet de mesures conservatoires pour une adaptation du projet. Ces opérations apportent de nouveaux éléments de connaissance sur l'occupation du territoire de la Touraine depuis les premières fréquentations humaines du Paléolithique jusqu'à la construction du paysage actuel.

Sans entrer dans le détail des fouilles, les résultats de plusieurs d'entre elles méritent d'être mis en évidence. Réalisée pendant l'hiver 2012-2013,

la fouille de Grouet, sur la commune de Pussigny, a concerné plus de 4 000 vestiges, sur une emprise de 8,2 hectares étirée sur près d'un kilomètre de long au fond d'un vallon humide.

L'épaisseur stratigraphique, atteignant parfois 3 m, a non seulement enregistré les traces des multiples occupations humaines au cours de ces 13 000 dernières années mais aussi son histoire environnementale et géomorphologique.

Les fouilles ont principalement porté sur des haltes de chasseurs-cueilleurs du Paléolithique, des sépultures sous tumulus du Néolithique, des habitats protohistoriques et médiévaux et des aménagements hydrauliques gallo-romains.

La traversée du territoire de la commune de Maillé a conduit à plusieurs opérations archéologiques. Aux lieux-dits « Villiers » et « la Roche », une fouille réalisée par l'Inrap sur le versant

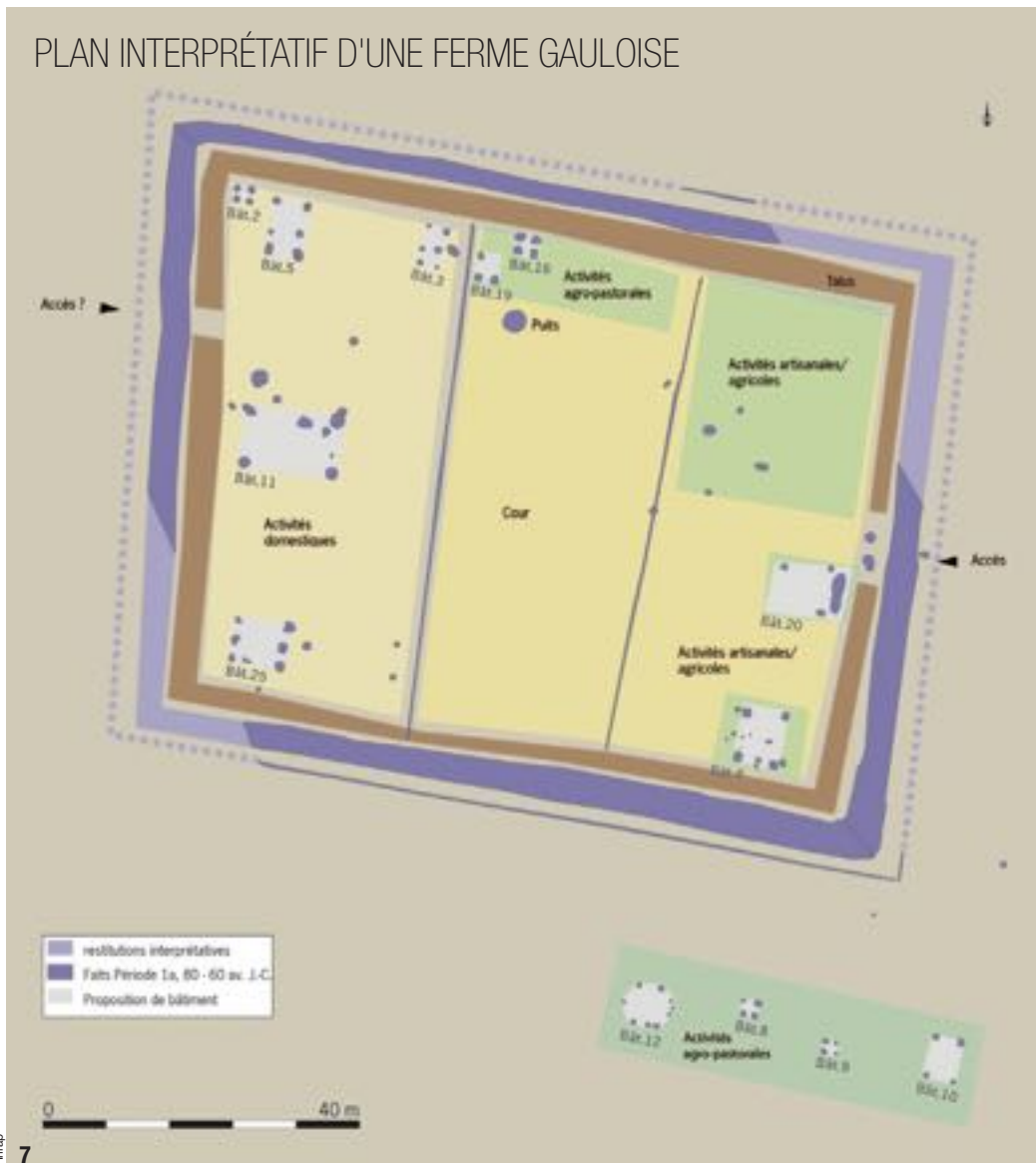




6

© Inrap

## PLAN INTERPRÉTATIF D'UNE FERME GAULOISE



© Inrap

7

**6- Lorsque les fouilles l'exigent, pour des découpes fins, l'Inrap met en œuvre des mini-pelles conduites par ses agents titulaires d'un CACES niveau 1.**

**7- À Montison, sur la commune de Sorigny, en Indre-et-Loire, plan interprétatif de la ferme gauloise.**

nord du ruisseau du Réveillon, sur une surface de 7,5 hectares, a mis au jour près de 3 000 vestiges immobiliers datant du 1<sup>er</sup> siècle avant J.-C. à nos jours.

L'essentiel des découvertes concerne l'époque médiévale pour laquelle l'identification de réseaux souterrains associés à des habitats alimente la réflexion sur ces vestiges singuliers.

### ... À UNE FERME GAULOISE

Une fouille a été réalisée à Sainte-Maure-de-Touraine au lieu-dit la Crone-raie, sur 3 hectares, par une trentaine d'archéologues de l'Inrap.

Les données sont en cours d'étude mais l'organisation d'ensemble du site et son évolution sont déjà perceptibles. Il est composé pour l'essentiel d'une ferme aristocratique gauloise dont l'occupation est interrompue pendant



un siècle, entre la fin du second âge du Fer (80 ans avant J.-C.) et la période gallo-romaine (20 ans après J.-C.). Entre 80 et 150 ans après J.-C., une vaste zone d'extraction détruit en partie cet habitat. Enfin, un puits médiéval daté de la deuxième moitié du XI<sup>e</sup>-XII<sup>e</sup> siècle témoigne de la dernière occupation du site.

Pour terminer avec ces exemples dans l'Indre-et-Loire, les fouilles menées au cours de l'été 2012 par l'Inrap à Montison, sur la commune de Sorigny, ont mis au jour les vestiges d'un habitat rural occupé durant près de trois siècles, de la période galloise (I<sup>er</sup> siècle avant J.-C.) à l'Antiquité (II<sup>e</sup>-III<sup>e</sup> siècle après J.-C.).

Les centaines de vestiges immobiliers et les très nombreux objets, essentielle-

ment de la céramique, renseignent sur la vie quotidienne des habitants.

La forte structuration de l'espace a permis de mettre en relief l'organisation fonctionnelle de l'établissement. La continuité de l'occupation entre les périodes galloise et antique fournit des éléments de réflexion intéressants sur l'évolution des plans des bâtiments et sur celle des techniques de construction. Ils concernent principalement une ferme galloise transformée au fil des années en *villa* gallo-romaine.

En effet, les fouilles ont montré que des changements radicaux mais progressifs étaient apparus tant au niveau de l'organisation spatiale et fonctionnelle de la ferme que de son aspect général. Les grands fossés de l'enclos d'origine ont disparu. De nouvelles constructions

**8- À Maillé, au lieu-dit Villiers, escalier d'accès à un souterrain sous un bâtiment médiéval du XI-XII<sup>e</sup> siècle.**

**9- Coupe de deux silos médiévaux comblés après leur abandon à Maillé-Villiers.**

**10- À Maillé, au lieu dit Villiers, souterrain médiéval.**

**11- Chantier classique de diagnostic par l'ouverture d'une tranchée à l'aide d'une pelle hydraulique.**

ont remplacé les bâtiments gallois devenus vétustes. Des murs, des fossés et des chemins enserrment et organisent désormais de façon géométrique les différentes zones, bâties selon une organisation de l'espace typique de la période antique.

La combinaison des champs, des bâtiments agricoles et de l'habitat forment une *villa* qui sera abandonnée au cours des II<sup>e</sup>-III<sup>e</sup> siècles après J.-C.

### VIENNE : UN VILLAGE MÉDIÉVAL

Lors du diagnostic effectué par l'Inrap à proximité de l'institut Larnay, à Biard, dans la Vienne, les sondages ont confirmé l'existence d'une occupation médiévale, partiellement connue grâce aux archives, mais dont la localisation demeurait incertaine.



8



9



10



11





**10- Fouille de l'aile nord de la *pars urbana* de la villa antique au lieu-dit l'Ouche Torse au nord de Luxé.**

**13- Vestiges d'une voie romaine.**

**14- Diagnostic archéologique dans un enclos circulaire à Rouillet-Saint-Estèphe (Charente).**

© Inrap 12



© Inrap 13



14

La Drac Poitou-Charentes a donc prescrit une campagne de fouilles afin de circonscrire le site, le dater et comprendre son évolution et sa forme d'occupation (habitats groupés, zone de cimetière, artisanat ?).

Le décapage, sur une superficie de 3,6 hectares, a révélé plus de 3 000 structures archéologiques. Les éléments mis au jour attestent bien l'existence d'un village médiéval occupé continuellement du VI<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> siècle. Un matériel archéologique très varié a été trouvé lors de la fouille : fragments de céramique du VIII<sup>e</sup> au XIII<sup>e</sup> siècle, éléments métalliques (clous, fers à cheval...), une monnaie, une plaque-boucle datées de la fin du Moyen-Âge. Enfin, de nombreux restes de faune (porc, bœuf, cheval, mouton) apparaissent dans les fosses, témoignant entre autres des pratiques alimentaires des villageois.

#### CHARENTE : UNE VILLA ANTIQUE

Au lieu-dit l'Ouche Torse à Luxé, en Charente, des sondages archéologiques ayant confirmé l'existence d'une villa antique, déjà repérée lors de prospections pédestres, la Drac de Poitou-

Charentes a donc prescrit une campagne de fouilles.

Le décapage, sur une superficie de plus de 1,6 hectares, a permis de dégager une partie de la villa datée des I<sup>er</sup> et II<sup>e</sup> siècles de notre ère. Celle-ci est localisée au nord de Luxé, bourg des rives de la Charente, dont les origines antiques sont attestées par plusieurs sites comme, par exemple, le sanctuaire de la Terme.

La partie résidentielle, maison du maître, se déploie sur plus de 1 000 m<sup>2</sup>. La fouille a permis de mettre au jour entre vingt et trente pièces qui représentent cependant plusieurs phases successives de construction.

La superficie de cette demeure, son mode de construction et la nature des aménagements intérieurs témoignent certainement du statut privilégié du maître des lieux. Ce domaine agricole reste classique dans son organisation (habitation, bâtiments agricoles).

Le plan en U des bâtiments résidentiels est un modèle connu. Toutefois, le site de la villa d'Ouche Torse - Près Perrin, a offert l'opportunité de fouiller une résidence au sein d'une partie de son environnement agricole.

#### VALORISATION DES RECHERCHES

Dans le prolongement de ses activités de recherches, la loi a donné à l'Inrap une mission de diffusion des résultats des opérations d'archéologie auprès de la communauté scientifique et du public.

Pour mettre en œuvre ces initiatives, l'institut travaille en partenariat avec les aménageurs, les collectivités territoriales, les SRA, les institutions de recherche, les musées...

Parmi les nombreuses opérations de valorisation, l'exposition « 100 000 ans sous les rails », présentant les découvertes faites sur le tracé de la LGV Sud-Est européenne a été accueillie dans quatre musées pendant deux ans. Elle a reçu 50 000 visiteurs.

#### L'ARCHÉOLOGIE PRÉVENTIVE : UNE DISCIPLINE CITOYENNE

L'archéologie préventive ne cherche pas des chefs-d'œuvre ou des monuments remarquables : elle vise à connaître les territoires et les sociétés du passé à travers les innombrables documents conservés par le sol, depuis les premières traces de présence humaine

au Paléolithique, au moins 500 000 ans avant notre ère, jusqu'à nos jours. En étudiant environ 10% des surfaces touchées par les travaux, elle permet de sauvegarder par l'étude les archives du sol avant leur destruction. □

<sup>(1)</sup> Sadil, Eveha, Arkemine, ArchéoLoire et Paléotime.

### ARCHÉOLOGIE ET LGV SEA : CHIFFRES CLÉS

**3 régions.**

**8 départements.**

**126 communes.**

**302 km de ligne.**

**200 archéologues mobilisés sur l'ensemble du projet.**

**1 700 hectares explorés.**

**500 000 d'histoire.**



# LGV SEA

(SUD EUROPE  
ATLANTIQUE -  
TOURS BORDEAUX)

Ligne voyageurs



#### LINÉAIRE :

302 km de double voie à grande vitesse  
+ 40 km de raccordements

#### VITESSE D'EXPLOITATION :

320 km/h

#### RÉALISATIONS :

500 ouvrages d'art dont 24 viaducs  
et 6 tranchées couvertes

#### MONTANT DU PARTENARIAT PUBLIC-PRIVÉ :

7,8 milliards d'euros

#### DATE DES TRAVAUX :

2012 - 2017 puis maintenance  
jusqu'en 2061

#### CONCESSIONNAIRE :

Lisea (Vinci Concessions - Ardian -  
CDC Infrastructures - Meridiam)

#### GROUPEMENT

#### CONCEPTION-CONSTRUCTION :

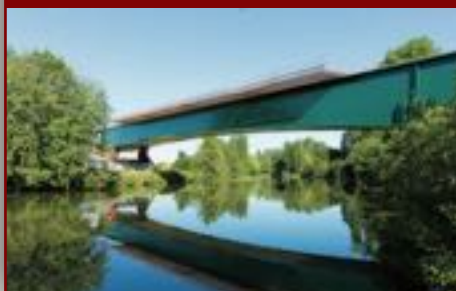
Cosea (Vinci - Cofely Ineo - Systra -  
Nge - Fayat Bec - Egis - Arcadis)



# LGV BPL

(BRETAGNE  
PAYS DE LOIRE)

Ligne voyageurs  
(25 km de Ligne mixte fret  
et voyageurs au  
nord du Mans)



#### LINÉAIRE :

182 km de ligne nouvelle  
+ 32 km de raccordements

#### VITESSE D'EXPLOITATION :

320 km/h

#### RÉALISATIONS :

241 ouvrages d'art dont 13 viaducs  
et 7 tranchées couvertes

#### MONTANT DU PARTENARIAT PUBLIC-PRIVÉ :

3,3 milliards d'euros

#### DATE DES TRAVAUX :

2011 - 2017

#### CONCESSIONNAIRE :

ERE (Eiffage Rail Express)

#### GROUPEMENT

#### CONCEPTEUR-CONSTRUCTEUR :

CLERE (Construction de la Ligne  
Eiffage Rail Express)





# LGV TANGER- KENITRA

Ligne voyageurs



**LINÉAIRE :**

200 km de ligne nouvelle, divisés en 2 tronçons d'environ 100 km chacun

**VITESSE D'EXPLOITATION :**

320 km/h

**RÉALISATIONS :**

256 ouvrages d'art dont 14 viaducs et 1 tranchée couverte

**DATE DES TRAVAUX :**

Novembre 2011/juillet 2016

**MAÎTRE D'OUVRAGE :**

ONCF

**MAÎTRE D'ŒUVRE (GROUPEMENTS) :**

- Egis Rail/Novéc (Tronçon Nord)
- Systra/Systra Maroc/CID/Team Maroc (Tronçon Sud)

**ENTREPRISES :**

Sonasr, Houar/Seprob, Sgfm, Covec, Assigna, Arab Contractors/Sefiani, Sinohydro



# LGV CNM

(CONTOURNEMENT  
NÎMES-MONTPELLIER)  
Ligne mixte fret et voyageurs



**LINÉAIRE :**

60 km de ligne nouvelle + 20 km de raccordements

**VITESSE D'EXPLOITATION :**

220 km/h pour les voyageurs

**RÉALISATIONS :**

188 ouvrages d'art dont 11 viaducs et 1 tranchée couverte

**MONTANT DU PARTENARIAT PUBLIC-PRIVÉ :**

2,0 milliards d'euros

**DURÉE CONCEPTION/CONSTRUCTION :**

2012 - 2017  
(puis maintenance jusqu'en 2037)

**MAÎTRE D'OUVRAGE :**

Oc'Via

**GROUPEMENT CONCEPTEUR ET CONSTRUCTEUR :**

Oc'Via Construction







© ULIAN MAROLLEAU

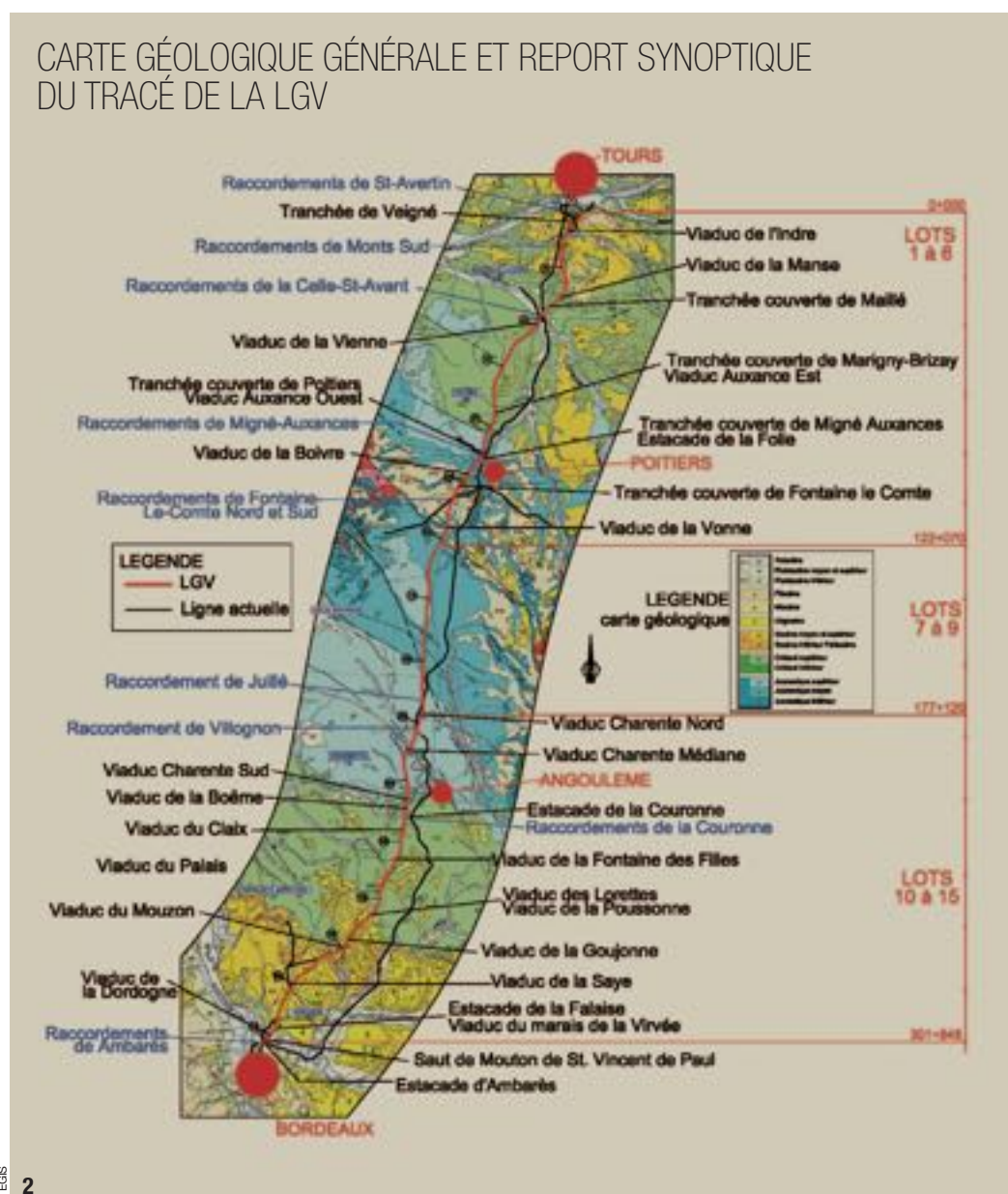


# LGV SEA : CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE

AUTEURS : BRUNO MAZARÉ, DIRECTEUR TECHNIQUE, EGIS GÉOTECHNIQUE - CHRISTIAN QUINT, RESPONSABLE DU PÔLE INFRASTRUCTURE, SYSTRA BORDEAUX - GUILHEM TEULADE, GÉOLOGUE, ARCADIS - OLIVIER GUÉRIN, DIRECTEUR TECHNIQUE TERRASSEMENT, COSEA SGI - PHILIPPE VERTEN, DIRECTEUR TECHNIQUE, COSEA SGI

LA NOUVELLE LIGNE FERROVIAIRE LGV SEA RELIANT TOURS À BORDEAUX TRAVERSE DES TERRAINS AUX CONDITIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES TRÈS DIFFÉRENTES. CELLES-CI ONT LARGEMENT INFLUENCÉ LE PROJET TERRASSEMENT AINSI QUE LES CONDITIONS DE FONDATION DES OUVRAGES D'ART ET REMBLAIS CONTIGUS, POUR S'AFFRANCHIR DE LA PRÉSENCE DE CAVITÉS ET DE SOLS PARFOIS TRÈS COMPRESSIBLES.

CARTE GÉOLOGIQUE GÉNÉRALE ET REPORT SYNOPTIQUE DU TRACÉ DE LA LGV



## LES CONDITIONS GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES GÉNÉRALES DE LA LIGNE

Le tracé de la LGV SEA traverse, du nord vers le sud, deux grands bassins sédimentaires : le Bassin Parisien au nord et le Bassin Aquitain au sud, séparés par la zone surélevée du « Seuil du Poitou », qui constitue une limite géomorphologique remarquable.

Un plan synoptique de la ligne avec report de la géologie et des principaux ouvrages est présenté en figure 2.

Ce « seuil du Poitou » est en fait un horst de terrains hercyniens (terrains éruptifs et métamorphiques) limité par un système de failles sub-verticales d'ampleur hecto-kilométrique, orienté globalement nord-ouest sud-est (structures tectoniques dites « sud-armoricaines »). Ce substratum hercynien affleure très localement au sud de Poitiers.

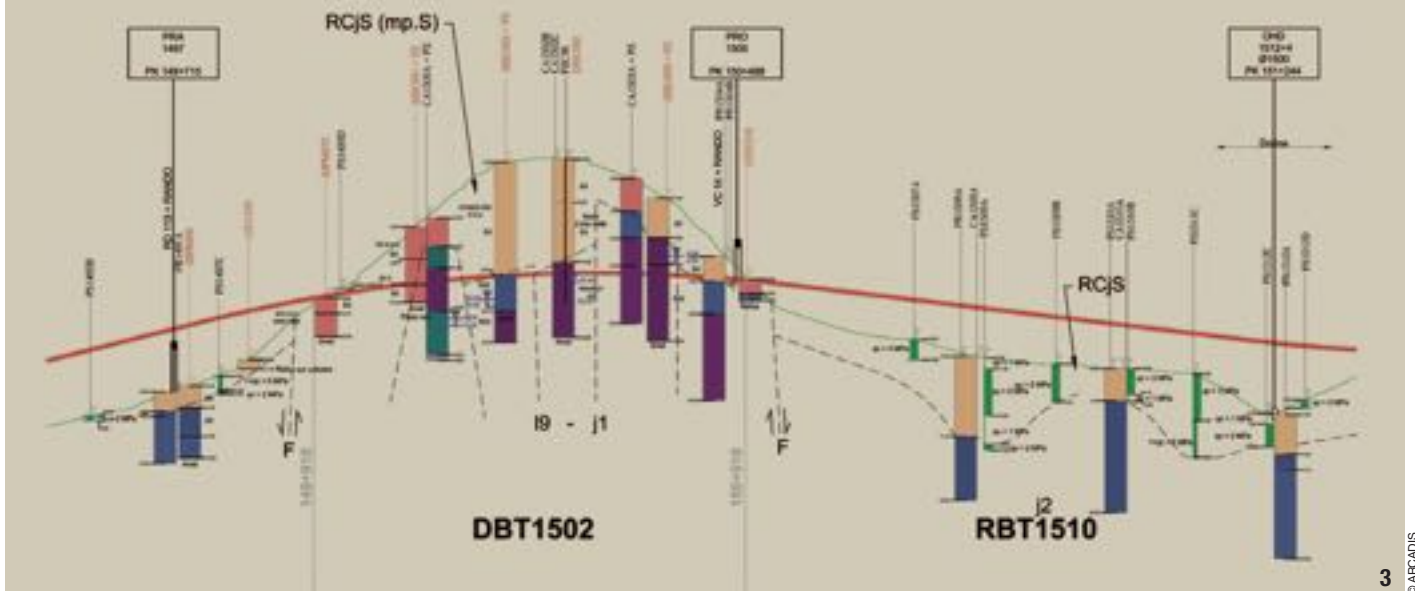
1- LGV SEA - franchissement de la vallée de la Dordogne.

2- Carte géologique générale et report synoptique du tracé de la LGV.

1- SEA HSL - crossing the Dordogne valley.  
2- General geological map and overview diagram of the HSL route.



## EXTRAIT DE MAQUETTE GÉOTECHNIQUE



3 © ARCADIS

De part et d'autre de ce seuil, les terrains sédimentaires se sont accumulés de façon quasi-symétrique, tant dans le Bassin Parisien que dans le Bassin Aquitain : on trouve de chaque côté la même succession de terrains jurassiques, crétacés et tertiaires.

Très schématiquement, la succession des différentes séries géologiques est la suivante, des terrains les plus récents vers les plus anciens :

→ **Quaternaire** : formations superficielles datant du Riss et du Würm (colluvions argilo-sableuses le plus souvent solifluées) et dépôts fluviaux récents (graves et sables).

→ **Oligocène inférieur et moyen** : marnes et calcaires lacustres tendres ;

→ **Éocène inférieur et moyen** : sables plus ou moins argileux, avec lentilles d'argiles grises à bleues ;

→ **Crétacé supérieur** : calcaires crayeux plus ou moins argileux, d'aspect monotone ;

→ **Jurassique inférieur, moyen et supérieur** : calcaires massifs en majorité, avec quelques niveaux de marnes en partie inférieure.

Le Crétacé inférieur est manquant (lacune stratigraphique).

Tous ces terrains présentent une stratification subhorizontale, faiblement inclinée vers le nord (Bassin Parisien) ou le sud (Bassin Aquitain) ; les failles sud-armoricaines affectent les terrains essentiellement dans la zone centrale du tracé (Seuil du Poitou).

Du point de vue hydrogéologique, les aquifères présentent des caractéris-

tiques différentes selon les stratigraphies :

→ Aquifères alluviaux, présents essentiellement au niveau de la Charente, et surtout au niveau de la Dordogne ;

→ Aquifères de l'Éocène, représentés par 2 niveaux ;

→ Aquifères du Crétacé, tantôt libres, tantôt captifs, caractérisés par des réservoirs hétérogènes (sables, grès, calcaires) ;

→ Aquifères du Jurassique supérieur, caractérisés par une nappe captive et un réseau karstique bien développé ; ce sont les plus importants.

Les risques géotechniques sont représentés en majeure partie par la présence de cavités karstiques plus ou moins développées dans les calcaires du Jurassique et par les anciennes carrières (à ciel ouvert ou souterraines) dans les calcaires crayeux du Crétacé,

généralement mal remblayées et mal localisées. On note également la présence de plusieurs zones compressibles dont la traversée de la vallée de la Dordogne est la plus significative. La figure 2 présente une carte géologique générale le long du tracé.

3- Extrait de maquette géotechnique.

4- Purge sous remblai de la Veude.

3- Extract from a geotechnical mock-up.

4- Drainage under the Veude embankment.

## LES RECONNAISSANCES RÉALISÉES

Les reconnaissances ont été réalisées en 3 phases principales, adaptées à l'enchaînement des études, à la criticité des ouvrages, à la définition du tracé et aux disponibilités des terrains, notamment en fonction des différentes phases de conception et de concertation :

→ **En phase APS** : la campagne réalisée par RFF porte sur l'identification des unités géologiques, accentuée sur certains ouvrages à enjeu (déblais à gros volume ou matériaux de bonne qualité, remblai sur alluvions compressibles, ouvrages d'art non courants). Les sondages sont de type carottés, pressiométriques, destructifs, pénétrométriques statiques et fouilles à la pelle. Ils sont complétés par des essais en laboratoire ainsi que de la géophysique et répartis tous les 200 à 400 m (densifiés autour des ouvrages d'art).

→ **En phase APD** : plus de 2 500 points de sondage permettent de consolider le modèle géotechnique (figure 3), définir les conditions de stabilité des ouvrages en terre, évaluer les temps de consolidation, cerner les zones karstiques et fournir un pré-dimensionnement des fondations d'ouvrage. Les reconnaissances de l'APS sont reconduites avec un appui par ouvrage et un point de sondage tous les 50 à 200 m en moyenne. La densité de sondages est adaptée aux objectifs des études, mais également à la capacité des entreprises de sondages à mobiliser des machines



4

© SYSTRA



sur une période courte (environ 8 mois) pour couvrir les 350 km de tracé. Cette campagne a également pour objectif de définir les classes de sol vis-à-vis des sollicitations sismiques ; pour cela, des profils MASW sont systématiquement effectués aux droits des ouvrages d'art non courants et éventuellement complétés par des diagraphies cross-hole pour les ouvrages les plus sensibles.

→ **En phase EXE** : une importante quantité de sondages est à nouveau réalisée (environ 3 500 points de sondage hors reconnaissances spécifiques de cavités). Cette quantité correspond aux zones non accessibles lors des phases précédentes, notamment pour des questions environnementales ; mais elle a aussi pour but d'affiner les conditions de réemploi des matériaux et de permettre aux entreprises de définir, en vue d'optimisations, des reconnaissances adaptées aux méthodes et aux phasages de construction des ouvrages.

#### **TRONÇON 1 ENTRE SAINT-AVERTIN (37) ET PAYRÉ (86) - PK 0 À 122**

Les études APD de ce tronçon ont été confiées à Inexia/Systra.

La partie nord du tracé de la LGV oscille sur un plateau dans différents niveaux du tertiaire comme les dépôts continentaux du Pliocène, les calcaires lacustres de Touraine et les conglomérats siliceux de l'éocène.

Ce plateau est entaillé de vallées où les terrains secondaires affleurent. C'est le cas de l'Indre où l'on trouve la craie sénonienne et la Manse avec le tuffeau du Turonien supérieur.

Plus au sud, de part et d'autre de la vallée de la Vienne, le relief plus vallonné est essentiellement constitué de tuffeau jaune surmontant le tuffeau blanc.



5  
© ARCADIS

**5- Présence de karst en déblai.**

**6- Purge des craies lacustres.**

**7- Photographie des échantillons de sol (échantillon remanié) au MEB.**

**5- Presence of karst in excavated material.**

**6- Draining the lacustrine chalk.**

**7- Photograph of soil samples (reworked sample) by SEM.**

La vallée de la Vienne comprend des alluvions anciennes ayant été exploitées en gravières et des alluvions récentes au droit des affluents tels que le Réveillon et la Veude de Grisay.

Puis le contournement de Châtellerault révèle les terrains plus sableux et argileux du Cénomaniens.

Sur les rebords du seuil du Poitou, à proximité de Poitiers, la succession des

étages calcaires du Jurassique supérieur et moyen est entrecoupée par les vallées de l'Auxance et de la Boivre. Au sud de cette rivière, la roche calcaire se fait plus gréseuse et karstique, avec recouvrement de formations résiduelles d'altération, elles-mêmes coiffées de sables argileux du Mio-Pliocène. Les vallées encaissées de la Vonne et de la Longère marquent la fin du tronçon 1. Du point de vue hydrogéologique, outre les nappes d'accompagnement des cours d'eau, les principaux aquifères recoupés par le projet sont rencontrés dans les formations du calcaire de Touraine, du Sénonien siliceux, de la craie du Turonien inférieur et des calcaires du Jurassique supérieur.

→ **Les argiles à spongolites et à silex : un casse-tête pour géotechnicien**

En phase APD, les interfaces entre ouvrages en terre et ouvrages d'art sont étudiées en termes de tassements absolus et différentiels et les dispositions constructives aux abords des ouvrages sont établies de façon à homogénéiser profondeur de purge et calage de fondations. En cas de tassements trop importants, il faut anticiper

les tassements par pré-chargement ou, si les contraintes du site ou du planning ne le permettent pas, envisager un renforcement du sol d'assise du type inclusions rigides.

Les valeurs pressiométriques obtenues dans les argiles à spongolites et à silex du Sénonien siliceux étant faibles, cet impact sur les dispositions constructives est important. Or, l'analyse des coupes et photos de carottes ne révèle pas de nature compressible, ces terrains n'étant d'ailleurs pas compatibles avec des essais œdométriques. Ce phénomène est en fait lié à la présence des silex qui élargissent, au moment de la rotation, la cavité soumise à l'essai pressiométrique. Cela provoque une sous-estimation des valeurs de pression limite et de module et donc une sur-évaluation des tassements.

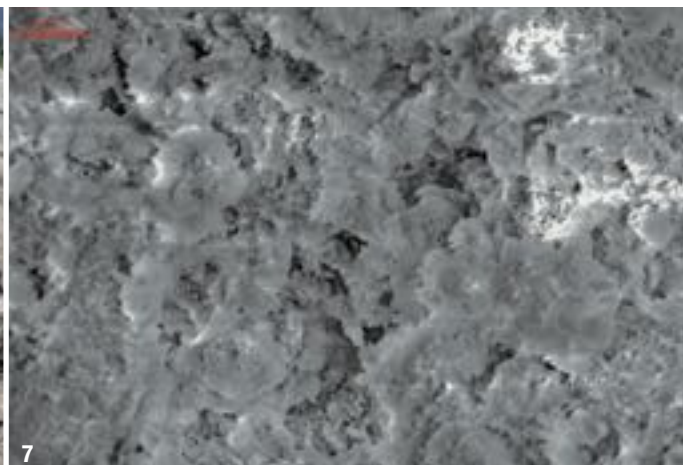
Les études d'exécution, élaborées à partir d'essais pénétrométriques et de sondages à la pelle mécanique, ont permis de relativiser les valeurs de tassements calculées précédemment, ce qui a été confirmé par les résultats de l'instrumentation des ouvrages.

→ **La Veude de Grisay : Remblai atypique**

Au droit du village de Ports-sur-Vienne, le calage du tracé de la LGV étant contraint par la nécessité de franchir à la fois la Vienne et l'autoroute A10, se manifeste par un positionnement biais du remblai 438 par rapport au lit du cours d'eau de la Veude de Grisay. Ce remblai, de ce fait asymétrique, a fait l'objet d'une reconnaissance géotechnique très détaillée qui a permis de modéliser la géométrie des couches d'assise contenant des tourbes et d'optimiser, par zones, les dispositions constructives spécifiques telles que purges jusqu'à 6 m de profondeur, drains verticaux et anticipation de surcharges (figure 4).

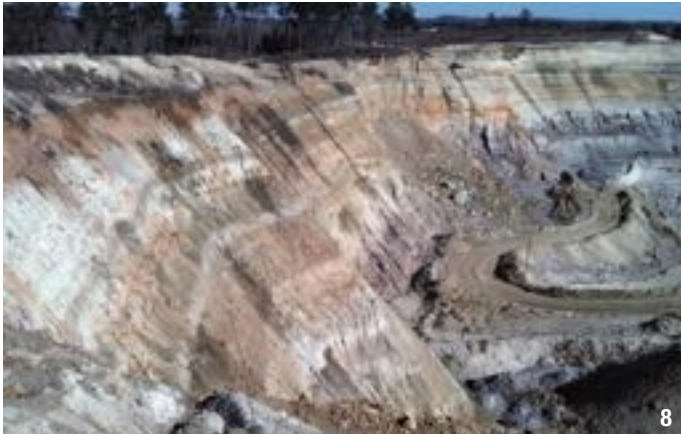


6  
© COSEA



7  
© EGIS





8  
© EGIS



9  
© MICHEL GARNIER

**TRONÇON 2  
ENTRE PAYRÉ (86) ET LUXÉ (16) -  
PK 122 À 177**

Les études APD de ce tronçon ont été confiées à Arcadis.

Ce tronçon qui recoupe les reliefs peu marqués entre Poitiers et Angoulême se caractérise par deux grandes unités géologiques :

→ Les faciès carbonatés (datés du Dogger et de l'Oxfordien), recoupés sur plus de 35 km, et eux-mêmes découpés en deux faciès : un faciès calcaire-marneux et un faciès calcaire à silex déposés en bancs réguliers à pendage faible vers le sud-ouest et affectés par de rares failles NNE-SSW. Parmi ces différents faciès, les calcaires les plus anciens présentent des modèles karstiques prononcés, trahis en surface par des réseaux de dolines (ou sotch).

→ Les terrains de couverture, représentés principalement par les Terres Rouges à Châtaigniers datées du Mio-Pliocène. Ces formations issues du démantèlement des formations antérieures contiennent des éléments et minerais hétérogènes (argiles, sables, fer, meulière, silex, quartz...). Ils recouvrent plus de 20 km du tronçon, sur des épaisseurs comprises entre 2 et plus de 20 m et nappent les dolines et les lapiez des modèles karstiques, conduisant à de fortes incertitudes sur la profondeur du toit du rocher. Leur plasticité leur confère peu de sensibilité à la liquéfaction mais en revanche, leur sensibilité à l'eau nécessite une protection, notamment dans les zones de hauts déblais.

La présence de ces paléo-reliefs caractérisés par une géométrie hétérogène conduit à de fortes incertitudes dans le modèle géologique.

Ces incertitudes ont été partiellement levées par la réalisation de campagnes de reconnaissances géophysiques (panneaux électrique principalement),

qui ont révélé, dans les calcaires du Dogger, des remplissages de plus de 20 m d'argiles décompressées, sans indice évident en surface.

Le réseau hydrographique développé au quaternaire a sculpté un relief composé de talwegs comblés d'alluvions récentes localement très compressibles, mais également de nombreux talwegs secs, dans les zones karstiques. Cette différence hydrologique est gouvernée par la lithologie du substratum : dans les zones à dominante marneuse, le toit de la nappe est sub-affleurant, mais très peu productif (formation de très faible perméabilité) alors que dans les zones calcaires karstiques, la nappe est profonde et s'établit dans les réseaux de discontinuités élargis par circulations souterraines (figure 5).

On relève sur ce tronçon la présence du horst de Montalembert vers le PK 150 qui constitue un complexe singulier associé aux linéations armoricaines majeures du socle Hercynien. Cette structure se compose de deux failles normales orientées N120° ayant provoqué l'affaissement des deux compartiments situés de part et d'autre.

**8- Front de carrière recoupant les formations de l'Éocène.**

**9- Inclusions rigides préfabriquées battues sous le remblai de la Virvée.**

**10- Estacade de la Folie.**

**8- Quarry face corresponding to Eocene formations.**

**9- Hammer-driven prefabricated rigid inclusions under the Virvée embankment.**

**10- La Folie viaduct.**

Il en résulte un pointement de formations liasiques marno-calcaires. Au franchissement de ce horst, les argiles présentant un fort risque de gonflement ont été substituées sous la plate-forme ferroviaire.

**TRONÇON 3  
ENTRE LUXÉ (16) ET AMBARES (33) -  
PK 177 À 302**

Les études APD de ce tronçon ont été confiées à Egis.

Ce tronçon, situé entre le viaduc de la Charente Nord et le raccordement d'Ambarès (Bordeaux), traverse la partie septentrionale du bassin Aquitain.

Les formations rocheuses, plus ou moins altérées, sont présentes sur la première partie du tracé. On retrouve les calcaires du Jurassique Supérieur jusqu'à Angoulême (30 km environ), puis des calcaires à dominance marneuse et/ou crayeuse jusqu'au PK 242. Au voisinage d'Angoulême, cette zone du tracé est impactée par la présence de passages argileux à marneux significatifs dans le Cénomanien : les argiles tégulines de Coquand (C2c) et les argiles lignitifères (C2a), ainsi qu'un niveau de sable argileux (C2c). Les argiles lignitifères présentent de faibles caractéristiques mécaniques, avec un risque de fluage. Elles ont été purgées dès lors qu'elles se situaient à faible profondeur sous la plate-forme ou à plus forte profondeur, comme sous le remblai d'accès Nord au viaduc de la Boème.

On retrouve également, au raccordement de la Couronne, un approfondissement du substratum, marqué par la présence d'un ancien dépôt de craies lacustres sur une profondeur pouvant atteindre 15 m. Cette zone particulière a nécessité des travaux importants, comme l'estacade de la Couronne et son remblai sur inclusions rigides (bloc technique et remblai à l'ouest de l'Estacade), afin d'assurer la portance des remblais et la maîtrise des tassements (voir figure 6 et article Symposium International Géorail 2014 « dimensionnement de géo-synthétiques en renforcement de remblais sur inclusions rigides »).



10  
© ALAIN MONTAUFIER



La photographie en figure 7 présente cette formation particulière au microscope électronique à balayage.

Au-delà du PK 242, le tracé est essentiellement réalisé dans les formations du Tertiaire, zone topographiquement moins accidentée conduisant à une succession importante de déblais et remblais.

L'aspect terrassement est ici plus délicat, du fait de sols constitués d'alternance de passages sableux et argileux (dans l'Éocène, figure 8), de sables micacés à lignite et autres sols argileux à marneux (dans l'Oligocène).

Au droit du Viaduc du Mouzon - PK 259 - et, dans une moindre mesure, au droit de l'ouvrage du Lary situé à proximité, cette partie du tracé est marquée par l'absence du Crétacé inférieur et surtout par une érosion et une altération généralisée du Crétacé supérieur qui s'est produite pendant quelques millions d'années avant l'arrivée des dépôts du Tertiaire. Dans cette zone, on observe une importante profondeur d'altération des terrains du Crétacé, associée à une karstification profonde, comblée par les formations de l'Éocène. Une attention toute particulière a été portée aux fondations profondes de ces ouvrages d'art, pour prendre en compte la forte disparité de la profondeur du toit du substratum au droit d'un même appui. Enfin, en arrivant à Bordeaux, on retrouve les formations du Quaternaire avec notamment la présence de sols fortement compressibles au droit du marais de la Virvée près de Saint-André-de-Cubzac. Cette zone, située en rive droite de la Dordogne, a nécessité la réalisation d'ouvrages importants : estacade de la Falaise, viaduc de la Virvée, remblai sur inclusions rigides (voir revue *Travaux* n°907 pour le plot d'essai).



© LISEA

**11- Saut de mouton de la Couronne (massif Terre Armée sur inclusions rigides).**

**11- La Couronne flyover (reinforced earth foundation on rigid inclusions).**

La Dordogne est franchie par un important viaduc dont les remblais d'accès reposent sur des alluvions, parfois tourbeuses, renforcées par un réseau d'inclusions rigides (figure 9).

#### TRAITEMENT DES CAVITÉS

Sur le tracé, le Jurassique et, dans une moindre mesure, le Crétacé, sont affectés par la présence de cavités. Cet aléa a conduit à de nombreuses campagnes de reconnaissance géophysique (profil électrique, cylindre électrique, électromagnétique, géo-radar, diagraphie gamma ray, etc.) complétées par des sondages mécaniques.

Sur quelques dizaines de kilomètres, les zones avec anomalies ont nécessité des traitements particuliers, tant pour les ouvrages d'art qu'en assise de remblai ou en arase de déblai : purge et renforcement par géo-grilles, approfondissement de la base des fondations,

injections de mortier ou de coulis en zones localisées, traitement plus systématique de zones étendues.

On notera plus particulièrement le viaduc du Claix et l'estacade de la Folie dont les fondations ont dû prendre en compte un fort aléa cavité.

L'estacade de la Folie (figure 10), près de Poitiers, a par ailleurs été réalisée dans un contexte urbain sensible, à proximité de voies routières à grande circulation et de la voie ferrée Tours - Bordeaux sous circulation. Cet ouvrage a fait l'objet d'un article spécifique dans la revue *Travaux* n°897.

#### RACCORDEMENTS ET ZONES URBAINES

Les 300 km de LGV sont raccordés à la ligne classique par 10 raccordements totalisant une quarantaine de kilomètres. Ces raccordements sont souvent situés dans des zones délicates au plan géotechnique et nécessitent des dispositions constructives particulières. C'est le cas notamment au niveau du raccordement de la Couronne, où, outre l'estacade de la Couronne et le remblai sur inclusions rigides associé, il a été nécessaire de réaliser des murs cloués définitifs pour élargir la plate-forme existante (figure 11).

De même, le pont René Coty, situé sur le raccordement d'Ambarès (Bordeaux), présente des culées réalisées avec le procédé Terre Armée afin que les murs de culée puissent absorber les tassements avant la réalisation des pieux. Le procédé Terre Armée est employé sur le tracé LGV et raccordements au droit de 11 structures dont 8 sauts de mouton ; 2 ouvrages concernent des voies circulées à 320 km/h (voir article Symposium International Géorail 2014 « ouvrages en Terre Armée construits sur la LGV SEA »). □

#### INTERVENANTS

**CONCESSIONNAIRE (50 ANS) : Lisea**

**CONSTRUCTEUR DE L'INFRASTRUCTURE : Cosea SGI**

**INGÉNIERIE DE CONCEPTION : Cosea SGC / SGI**

- TRONÇON 1 : Inexia - Systra
- TRONÇON 2 : Arcadis
- TRONÇON 3 : Egis Géotechnique

#### ABSTRACT

### SOUTH EUROPE ATLANTIC (SEA) HSL: GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL CONTEXT

BRUNO MAZARÉ, EGIS - CHRISTIAN QUINT, SYSTRA - GUILHEM TEULADE, ARCADIS - OLIVIER GUÉRIN, COSEA SGI, PHILIPPE VERTEN, COSEA SGI

The South Europe Atlantic (SEA) high-speed rail line passes through two sedimentary basins, the Paris and Aquitaine basins, separated by the Seuil du Poitou area, which corresponds to a Hercynian horst. The main geotechnical problems faced are the presence of cavities in the Jurassic terrains and the control of subsidence in very heterogeneous terrains or highly compressible terrains such as the alluvia of the Dordogne valley. The cavity risk was the subject of specific geotechnical survey, focused on electrical and electromagnetic geophysical prospection. Drainage, foundation deepening, soil reinforcement with geogrids and grouting were employed. Some compressible areas underwent strengthening by Rigid Inclusions or accelerated consolidation by vertical drains. Several backfills were carried out by the Terre Armée® (reinforced earth) process. □

### LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD SUR EUROPA ATLÁNTICO (LGV SEA): CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO

BRUNO MAZARÉ, EGIS - CHRISTIAN QUINT, SYSTRA - GUILHEM TEULADE, ARCADIS - OLIVIER GUÉRIN, COSEA SGI, PHILIPPE VERTEN, COSEA SGI

La vía ferroviaria de la línea de alta velocidad Sur Europa Atlántico atraviesa las dos cuencas sedimentarias parisina y aquitana, separadas por el umbral de Poitou que corresponde a un horst Herciniano. Las principales problemáticas geotécnicas encontradas son la presencia de cavidades en los terrenos del Jurásico y el control de los asentamientos en terrenos muy heterogéneos o muy compresibles como los aluviones del valle del Dordogne. El riesgo cavidad fue objeto de reconocimientos específicos, centrados en una prospección geofísica eléctrica y electromagnética. Se ha procedido a la realización de purgas, la profundización de los cimientos, el refuerzo del suelo por geomallas y la aplicación de inyecciones. Algunas zonas compresibles fueron objeto de refuerzo por Inclusiones rígidas o de consolidación acelerada por drenes verticales. Varios terraplenados se realizaron por el procedimiento Terre Armée®. □





1  
© P. LE DOARE

# LES MOUVEMENTS DES TERRES DE LA LGV SUD EUROPE ATLANTIQUE (SEA)

AUTEURS : CHRISTOPHE PERSOZ, DIRECTEUR ADJOINT, COSEA-SGI (VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT) - NICOLAS FLEURIOT, DIRECTEUR TERRASSEMENT ET PILOTAGE TOARC, COSEA-SGI (VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT)

LE PROJET SEA, AUJOURD'HUI LE PLUS GROS PPP FERROVIAIRE DU MONDE, EST AUSSI LE PLUS IMPORTANT CHANTIER DE GÉNIE CIVIL D'EUROPE DE CES DERNIÈRES ANNÉES. LE PRÉSENT ARTICLE DÉCRIT LA RÉALISATION DES TERRASSEMENTS PAR LE SOUS-GROUPEMENT INFRASTRUCTURES (SGI) DU CONCEPTEUR-CONSTRUCTEUR COSEA. LE LINÉAIRE DE PLATE-FORME À RÉALISER S'ÉLÈVE À 340 KM, DONT 38 KM DE RACCORDEMENTS AU RÉSEAU FERRÉ EXISTANT, REPRÉSENTANT AU TOTAL 70 MILLIONS DE M<sup>3</sup> DE TERRASSEMENT. L'ENSEMBLE DES TRAVAUX DE TERRASSEMENT A ÉTÉ RÉALISÉ EN 2 ANS ET DEMI (AVRIL 2012 - AUTOMNE 2014) AVEC UN PHASAGE TRÈS SERRÉ LIÉ À L'ENCHAÎNEMENT AVEC LES TRAVAUX FERROVIAIRES.

## INTRODUCTION

Le Génie Civil du Projet SEA se divise en 15 lots de travaux, définis par RFF (Réseau Ferré de France) avant l'appel d'offres (figure 2) ; la longueur des lots varie entre 20 et 30 km, correspondant pour chacun d'entre eux, dans la majeure partie des cas, à des mouvements des terres équilibrés.

Ces lots comprennent au total environ 487 ouvrages d'art dont environ 25 OANC (Ouvrages d'Art Non Couverts) qui constituent autant d'inter-

faces à gérer pour l'activité terrassement.

Le mouvement des terres est globalement excédentaire, d'environ 15 millions de m<sup>3</sup>, il ne nécessite pratiquement pas d'emprunts (figure 3).

**Géologie (voir article page 18) :** De manière schématique, on peut retenir les profils géologiques suivants : surtout des marnes au nord (lots 1 à 3), des matériaux rocheux marno-calcaires sur les lots 4 et au nord du lot 5 (abords de Poitiers), des marnes et des

**1- Vue générale des raccordements de Fontaine-le-Comte (ligne existante Poitiers-La Rochelle).**

**1- Overview of Fontaine-le-Comte connections (existing Poitiers - La Rochelle line).**

argiles depuis le sud du lot 5 jusqu'au lot 9, puis des matériaux rocheux calcaires sur les lots 10-11 ; enfin, des marno-calcaires sur les lots 12 et 13 et des sables fins plus au sud.

**Cavités :** cette problématique, qui se manifeste surtout sur les lots 5 à 9, a été traitée dans le but de ramener le risque à un niveau résiduel acceptable au sens de la sécurité ferroviaire, en appliquant les méthodologies usuellement développées sur les précédents projets de LGV :



- Investigations préalables (bibliographiques) en phase offre ;
- Investigations géophysiques en phase APD ;
- Sondages destructifs dans les zones comportant des anomalies, traitements lourds dans les cas qui le nécessitent, notamment injections de 3 zones importantes sur les lots 5 (DBT 0982), 7 (DBT 1280), et 8 (RBT 1510 et DBT 1550).

Dans plusieurs cas, des géo-grilles de renforcement ont été mises en œuvre à l'arase, avec, en complément pour l'un d'entre eux, un système d'instrumentation et de suivi en temps réel par fibre optique (remblai RBT 1510).

Une allocation des risques originale a été mise en œuvre sur ce projet, dans le cadre du forfait de rémunération du concepteur-constructeur : l'ensemble du risque géotechnique est porté par le SGI, en vertu du principe selon lequel le porteur d'un risque doit être l'entité la mieux placée pour mettre en œuvre les parades correspondantes. Soit, pour la problématique concernée : modification de la géométrie des ouvrages et/ou du planning des travaux, traitements de sols, etc.

**L'ORGANISATION MISE EN PLACE**

Dès la phase études, il a été décidé de mettre en place 7 sections (une section comprenant 2 à 3 lots), chacune étant responsable :

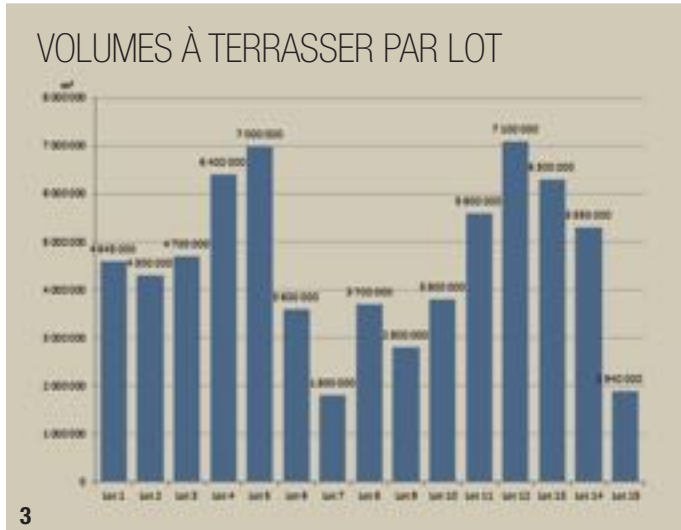
- De sa contribution à l'APD (géométrie du projet + stabilité des ouvrages en terre) ;
- De la mise en œuvre des moyens pour réaliser les études EXE et les travaux ;
- De la recherche des dépôts ;
- Des budgets de réalisation des études EXE et des travaux.

Par ailleurs, les obligations du contrat et l'analyse des moyens de terrassement (personnel + matériel) susceptibles d'être mis en œuvre par Vinci Construction Terrassement et ses partenaires Nge et Razel-Bec, ainsi que la nécessité de réaliser les 15 lots de manière simultanée, a conduit à sous-traiter 3 lots (lot 3, lot 7 et lot 9) à des groupements pilotés respectivement par les entreprises Dtp Terrassement, Charier, et Valerian.

Enfin, l'allocation des responsabilités au sein du groupement Cosea confère à chaque entité le soin de mettre en place ses propres modalités de contrôle intérieur (interne et externe), en études comme en travaux, le contrôle extérieur étant assuré par la Direction de



2



3

© SOURCE COSEA

2- Carte schématique du Projet SEA - lots 1 à 15.  
3- Volumes à terrasser par lot.

2- Schematic map of the SEA project - work sections 1 to 15.  
3- Earthworks volumes per work section.

Projet de Cosea de manière à garantir la conformité du produit. En cela, le Sous-Groupement Constructeur SGI endosse une partie de la mission dévolue habituellement, en France, au maître d'œuvre (études et travaux).

**LE DÉROULEMENT DES TERRASSEMENTS GRANDE MASSE PRÉPARATION DU CHANTIER**

La stratégie retenue par Cosea a été de préférer la réalisation de talus de

faible pente (majoritairement 2 pour 1, ou plus, pour les déblais, et 2 pour 1 de manière systématique pour les remblais), afin de limiter les apports de matériaux nobles et/ou granulaires nécessaires en cas de réalisation des confortements de type masque ou autre.

Le long délai compris entre l'attribution du projet au groupement (été 2010) et le démarrage du chantier (printemps 2012) a permis d'en assurer la préparation pour ce qui concerne :

- L'optimisation de la conception (incluant par exemple 5 à 6 cas de relèvement du profil en long pour optimiser les mouvements des terres) ;
- Son appropriation par les équipes en charge de la réalisation, par exemple en affinant le mouvement des terres de chaque lot en fonction :
  - des contraintes de planning,
  - des dépôts disponibles.

Par ailleurs, le caractère indépendant des lots entre eux a permis d'élaborer pour chacun un mouvement des terres et un planning associé réalisé avec le logiciel Tilos® (figure 4), dans le respect de l'échéancement des activités postérieures.

La période de livraison des plateformes aux sous-groupements ferroviaires s'étend ainsi d'avril 2013 à juin 2015.

Enfin, il y a lieu de noter que la conception des ouvrages a été réalisée sur la base d'un référentiel technique élaboré et décliné sur le projet en notes d'hypothèses au stade de l'APD, puis en spécifications techniques détaillées au stade études d'exécution/travaux ; ces dernières définissent les critères d'acceptation des ouvrages réalisés et les plans de contrôle associés.

Ces points étant fixés, en mettant à profit les nombreux sondages et essais de caractérisation réalisés durant cette phase (un tous les 300 m environ), les études APD et EXE ont permis de conduire une démarche d'optimisation des dispositions constructives (nature de la Partie Supérieure des Terrassements, dispositifs de confortement des talus, etc.).

Enfin, certaines interfaces préexistantes ont pu être mises à profit pour transporter des matériaux, comme par exemple l'utilisation de l'autoroute A10 (sur les lots 1 et 15), en relation avec les concessionnaires Cofiroute et ASF, pour limiter l'utilisation de la voirie locale.



**LE DÉMARRAGE DU CHANTIER**

Dès la promulgation des arrêtés Loi sur l'Eau et CNPN en mars 2012 les travaux ont pu démarrer avec, pour chaque lot, une stratégie de :

- Libération des accès aux principaux viaducs ou ouvrages d'art prioritaires ou nécessaires pour permettre les mouvements des terres ;
- Préparation des plates-formes des bases-travaux de Nouâtre (37) et Villognon (16) dont la livraison par le SGI était due pour l'été 2013 ;
- Démarrage au plus tôt des ouvrages en terre les plus importants (notamment le DBT 2140, lot 12).

En mai 2012, sont apparues les premières difficultés dues à la repousse de la végétation sur les emprises de la trace préalablement décapées, celle-ci étant réputée propice à la reproduction de diverses espèces animales. Ceci a contraint le SGI à sélectionner les sites prioritaires d'interventions et à effectuer sur chacun de ces sites une analyse d'impact écologique, qui a pu être réalisée dans de bonnes conditions grâce notamment à la technologie Lidar et au SGI de Cosea, afin de pouvoir démarrer effectivement les travaux.

**LA GESTION DU PARC MATÉRIEL**

Au plus fort de la mobilisation, le chantier a utilisé 1300 machines, hors camions routiers.

Principaux échelons utilisés :

- 1 pelle de 120 t (grands déblais du lot 10, puis lot 02) ;
- 9 pelles de 90 t (+ échelons de dumpers CAT 773), c'est-à-dire pratiquement un échelon par lot ;
- 7 échelons de scrapers ont été en activité sur les lots 4, 5, 6, 8, 11, 12, 13, 14.

Ce sont pas moins de 11 bases de maintenance/ateliers, pratiquement une par lot, destinées à assurer l'entretien et les réparations des engins, qui ont été mises en place tout au long du tracé par les différents membres du groupement SGI et les sous-traitants.

**LE DÉROULEMENT DES TERRASSEMENTS**

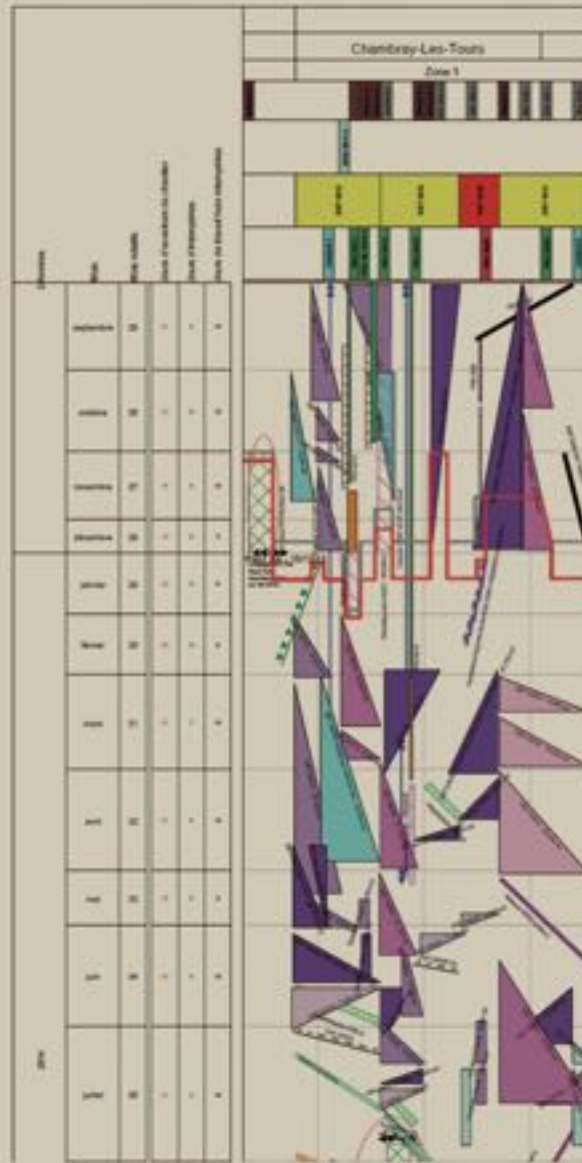
La majeure partie des terrassements grande masse a été réalisée entre juin 2012 et juillet 2014 soit en 25 mois. (figure 5).

Cette phase a été émaillée de nombreux aléas, tant liés à la météorologie (pluviométrie très largement au-dessus de la moyenne) qu'aux découvertes de cavités (figures 6 et 7).

Un pic de production hebdomadaire de 1,75 millions de m<sup>3</sup> terrassés a été

**EXEMPLE DE PLANNING DE MOUVEMENT DES TERRES TILOS**

Lot 01 (extrait)



4

**HISTOGRAMME DES VOLUMES RÉALISÉS par mois (grands terrassements)**



5

4- Exemple de planning de mouvement des terres TILOS - lot 01 (extrait).

5- Histogramme des volumes réalisés par mois (grands terrassements).

4- Example of TILOS earthmoving schedule - work section 01 (extract).

5- Bar chart of volumes executed per month (major earthworks).

observé (juillet 2013), par des conditions météorologiques favorables, alors que tous les lots étaient en activité (figure 3).

Sur les lots 4 et 5, aux environs de Poitiers, près de 1,9 millions de m<sup>3</sup> ont dû être extraits après minage (figure 9), en interférence avec l'autoroute A10 toute proche (un, voire 2 tirs par jour, à heure fixe les mardis, mercredis, jeudis).

Au vu des volumes à réaliser, la capacité à traiter les matériaux est un pré-requis fondamental pour permettre une livraison en temps et en heure.

Bon nombre de remblais ont donné lieu à un traitement à la chaux (figure 10), selon des pourcentages variant de 0,5 à 2% selon la nature des matériaux, leur destination et leur hygrométrie.

25 ateliers de traitement de sol ont été déployés sur l'ensemble de la trace, la principale limite étant la capacité des fournisseurs à livrer en temps et en heure, jusqu'à 4750 t soit 170 porteurs environ par semaine ; ceci représente une quantité totale de 300 000 t sur la durée du Projet.

**LES INTERFACES AVEC LES AUTRES ACTIVITÉS**

Les mouvements des terres ont de nombreuses interfaces avec les autres activités, principalement les 487 ouvrages d'art et les 635 ouvrages hydrauliques interceptant la trace, mais aussi les rétablissements de voirie et les raccordements au réseau ferré national exploité (11 raccordements au total).

Pour ces derniers, la quasi-intégralité des travaux de terrassement a été réalisée par le Sous-Groupement Infrastructures (SGI), jusqu'à l'interface avec



6- Histogramme de la pluviométrie (par mois).

7- Découverte de cavité sur le Lot 05 (DBT 0982).

8- Déblai en cours de réalisation (lot 2).

9- Déblai en cours de réalisation (lot 4).

10- Traitement à la chaux.

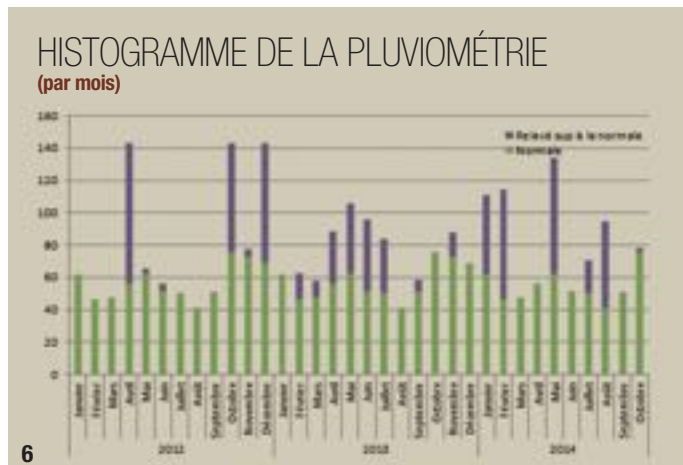
6- Rainfall bar chart (per month).

7- Cavity discovery on work section 05 (DBT 0982).

8- Earth cut in progress (work section 2).

9- Earth cut in progress (work section 4).

10- Lime treatment.



6 SOURCE COSEA

les ouvrages existants, sous contrainte d'exploitation ferroviaire (figure 1). Comme pour tout projet linéaire d'infrastructure, il existe une forte interface avec les ouvrages d'art et les rétablissements des voiries locales ; ce d'autant que les ouvrages d'art ont démarré 3 à 6 mois plus tard que prévu. De nombreux rétablissements (comme sur la figure 11) ont ainsi dû être coupés de manière totale pendant un certain laps de temps, en concertation avec les collectivités locales.

LA PARTIE SUPÉRIEURE DES TERRASSEMENTS (PST)

L'objectif de la PST est d'assurer une portance supérieure ou égale à 60 MPa (PST granulaire) et 80 MPa (PST traitée). L'intense activité d'extraction des carrières existantes générée par le projet et les conditions économiques d'approvisionnement ont conduit à préférer, chaque fois que c'était possible, la réalisation de PST avec des matériaux rocheux extraits du site, à l'état naturel, ou si nécessaire élaborés par concas-

sage, dans les lots les plus favorables (lots 4, 5, 7 à 12), représentant un linéaire d'environ 105 km.

Sur les 235 km restants, les PST ont été réalisées par traitement à la chaux mais aussi, ponctuellement, au liant.

COUCHE DE FORME ET SOUS-COUCHE

Compte tenu des tonnages importants requis, de l'absence de matériaux de qualité suffisante sur le tracé, de l'imbrication forte entre la fabrication de ces matériaux et celle du ballast, ces couches de structure ont été approvisionnées sur 25 stocks provisoires répartis le long de la trace, pendant la période de réalisation des grands terrassements, chacun d'entre eux ayant nécessité une procédure d'autorisation ou déclaration ICPE (Installations Classées pour l'Environnement). Le SGI, dans un souci de meilleure économie du projet et de préservation des ressources, a procédé au réemploi de co-produits de ballast (3 millions de tonnes environ) en provenance des carrières de Luché-Thouarsais (79), Roy à Saint-Varent (79), Kléber Moreau-Donia à Saint-Maixent-l'École (79), et Trmc-Pagnac à Verneuil-sur-Vienne (87). ▷

© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT



7

© LISEA



8



9

© A. MONTAUFIER



10

© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT





11

© P. LE DOARE

Ceux-ci ont été majoritairement utilisés sur les lots les plus proches (lots 1 à 6 notamment) en sous-couche et pour des blocs techniques d'ouvrages d'art. La réalisation de la sous-couche en grave-bitume, sur 43,5 km (lots 14 et 15, du PK 250,9 au PK 294,4) permet une réduction des volumes terrassés d'environ 250 000 m<sup>3</sup> (figures 12 et 13).

Les contrôles réalisés (intérieur et extérieur) et le traitement au fil de l'eau des non-conformités constatées ont permis de limiter à de très rares cas les reprises à réaliser sur les ouvrages en terre. Enfin, la conception sécuritaire des ouvrages en terre a permis d'éviter, jusqu'à ce jour, toute reprise de talus après réalisation.

### RESSOURCES HUMAINES ET PRÉVENTION

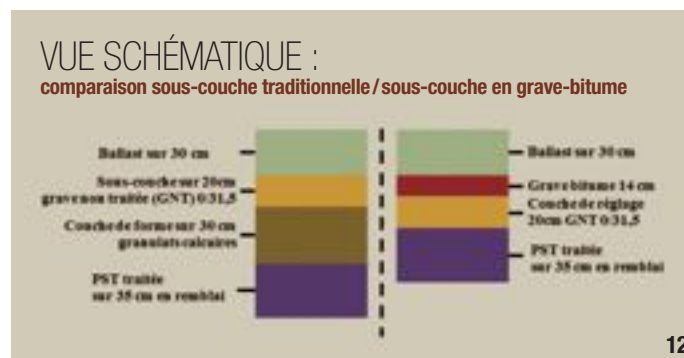
Bien évidemment, compte tenu de l'importance du projet, il a été mis en place dès le démarrage une organisation décentralisée au niveau de chaque section, pour assurer la mobilisation au sein des entreprises partenaires et le recrutement externe des quelque 3000 col-

laborateurs de l'activité terrassement. Le projet a en effet donné lieu, en liaison avec les collectivités locales concernées, au recrutement de 800 collaborateurs formés par les membres du groupement sur 5 plates-formes, dans le cadre du programme d'insertion POE (Préparation Opérationnelle à l'Emploi) mis en place par Vinci Construction Terrasse-

### RÉSULTATS TECHNIQUES OBTENUS

La définition technique des ouvrages a été finalisée en phase de préparation de chantier.

Les 7 laboratoires mis en place par le SGI ont permis d'assurer un suivi de la qualité des ouvrages, conformément au schéma de management de la qualité développé sur le projet.

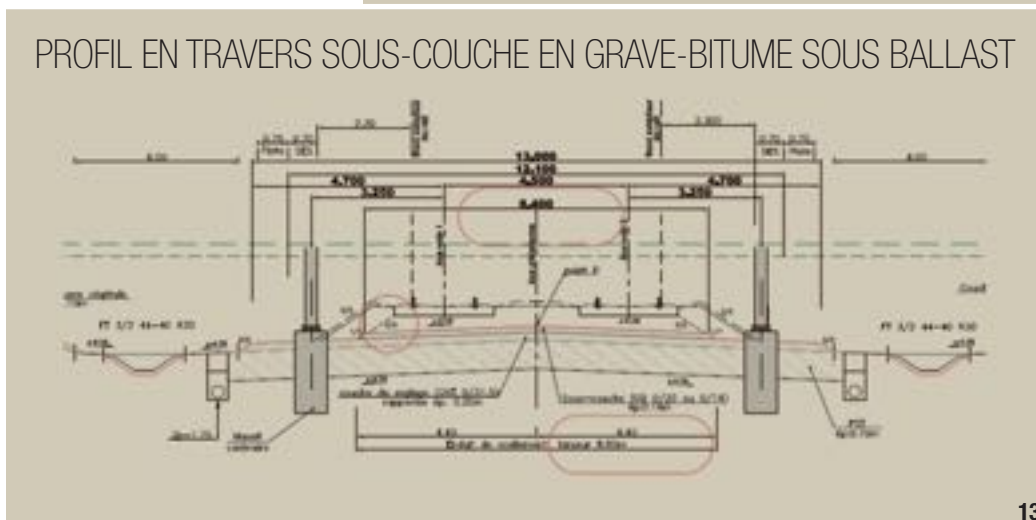


12

11- Exemple de rétablissement de voirie - TRC 0751 - Marigny-Brizay.

12- Vue schématique : comparaison sous-couche traditionnelle / sous-couche en grave-bitume.

13- Profil en travers sous-couche en grave-bitume sous ballast.



13

© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

11- Example of road reconnection - TRC 0751 - Marigny-Brizay.

12- Schematic view: comparison of conventional sub-base and bitumen-bound graded aggregate sub-base.

13- Cross section of sub-base of bitumen treated base material under ballast.





14

© P. LE DOARE

ment, Nge et Razel-Bec avec l'appui des Collectivités Locales, et dans le cadre d'un accord signé entre le Syndicat des Terrassiers de France, la Fnnp, l'État et Pôle Emploi.

Dans le domaine de la prévention, les principes fondamentaux des membres du groupement ont été appliqués, axés sur la formation au poste de travail, la limitation au maximum de la co-

**14- Plate-forme achevée, septembre 2014, lot 11.**

**14- Completed subgrade, September 2014, work section 11.**

activité (ouvrages d'art, chaussées, ...), la lisibilité des itinéraires sur le chantier, la séparation des trafics VL et PL, la préparation en amont des activités. Aucun accident grave n'a été déploré.

## CONCLUSION

La réalisation des travaux de terrassement du Projet SEA a constitué un défi sans précédent à cette échelle (15 lots en simultané), dans un délai aussi contraint. Il a mobilisé des effectifs très importants, dans des conditions parfois difficiles, notamment sur le plan de la météorologie.

Le principe d'organisation des contrôles au niveau du groupement, et l'absence d'une maîtrise d'œuvre dûment identifiée qui en découle, a constitué une innovation majeure pour beaucoup de collaborateurs.

La priorité accordée au respect du délai, juste après la priorité absolue accordée à la prévention, a conduit à un management du chantier peu commun, orienté vers une décentralisation au niveau de chaque section des activités d'études, de production et de contrôle externe. Ceci, accompagné d'une préparation aussi poussée que possible, a permis de respecter les échéances définies sur le projet fin 2010, de manière à poser les premiers rails en section courante en octobre 2014 comme prévu. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

- 70** millions de m<sup>3</sup> de terrassements
- 340** km de plate-forme
- 1300** machines (hors camions routiers),
- 3000** collaborateurs à la pointe de l'activité (estimation de la part terrassement)
- 192** dépôts définitifs

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**CONCÉDANT : RFF**

**CONCESSIONNAIRE : Lisea (Vinci Concessions - Meridiam infrastructure - Caisse des Dépôts - Ardian)**

**GROUPEMENT CONCEPTEUR-CONSTRUCTEUR : Cosea**

**SOUS-GROUPEMENT INFRASTRUCTURES : Cosea-SGI, composé de :**

- Vinci Construction Terrassement
- Dodin Campenon Bernard
- Vinci Construction Grands Projets
- Vinci Construction France
- Nge
- Razel-Bec
- Eurovia Grands Projets et Industrie, Eurovia Poitou-Charentes-Limousin

## ABSTRACT

### EARTHMOVING FOR THE SOUTH EUROPE ATLANTIC (SEA) HSL

CHRISTOPHE PERSOZ, COSEA-SGI (VINCI) - NICOLAS FLEURIOT, COSEA-SGI (VINCI)

The SEA project has been the biggest civil engineering project in recent years with regard to earthworks. The length of subgrade to be executed is 340 km, including 38 km of connections to the existing railway network, representing a total of 70 million cu.m. The priority assigned to compliance with deadlines (just after the absolute priority assigned to workplace safety) resulted in a rather atypical project management system, focused on decentralisation of each section of the design engineering, production and external inspection activities. This priority, together with very thorough preparation, made it possible to comply with the original deadlines so as to lay the first rails on standard sections and perform all earthworks in two-and-a-half years (April 2012 - autumn 2014). □

### LOS MOVIMIENTOS DE TIERRAS DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD SUR EUROPA ATLÁNTICO (LGV SEA)

CHRISTOPHE PERSOZ, COSEA-SGI (VINCI) - NICOLAS FLEURIOT, COSEA-SGI (VINCI)

El proyecto SEA ha constituido la obra más importante de ingeniería civil de los últimos años en términos de movimientos de tierras. La longitud de la plataforma que se debe realizar es de 340 km, de los cuales 38 km de conexiones a la red ferroviaria existente, lo que representa un total de 70 millones de m<sup>3</sup>. La prioridad concedida al respeto del plazo (por detrás de la prioridad absoluta otorgada a la prevención) condujo a una gestión poco común de la obra, orientada hacia una descentralización a nivel de cada sección de las actividades de proyectos, de producción y de control externo. Esta descentralización, acompañada de una preparación lo más exhaustiva posible, permitió respetar los plazos fijados inicialmente para tender los primeros carriles en tramo normal y realizar el conjunto de las excavaciones en 2 años y medio (abril de 2012 - otoño de 2014). □





1 - Vue d'ensemble du viaduc de la Dordogne.

1 - General view of the Dordogne viaduct.

© LILIAN MAROLLEAU POUR LISEA

# VIADUC DE LA DORDOGNE - UN SITE ET UN DÉLAI CONTRAINTS

AUTEUR : ROMAIN NICOLAS, CHEF DE PROJETS, DODIN CAMPENON BERNARD

LA CONSTRUCTION DU VIADUC DE LA DORDOGNE VIENT DE S'ACHEVER AU TERME DE 31 MOIS DE TRAVAUX. ÉDIFIÉ DANS UN SITE COMPLEXE, L'OUVRAGE LE PLUS LONG DE LA LGV SEA TOURS-BORDEAUX A REPRÉSENTÉ UN IMPORTANT DÉFI TECHNIQUE, RELEVÉ AU MOYEN D'UNE CONCEPTION ADAPTÉE À L'ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE ET DE MÉTHODES DE CONSTRUCTION GARANTISSANT LE PLANNING.

## CONTEXTE

Le viaduc de la Dordogne (figure 1), situé au nord de Bordeaux sur les communes de Saint-Romain-La-Virvée et de Saint-Loubès, est l'ouvrage d'art le plus long (1 319 m) de la ligne à grande vitesse Sud Europe Atlantique. Il franchit la Dordogne en amont des ouvrages de l'autoroute A10 par un tablier de 12 m de largeur portant deux voies ferrées circulées à 230 km/h (vitesse de dimensionnement de l'ouvrage). Soumis à de nombreuses contraintes, notamment la complexité hydraulique et géotechnique du site, le viaduc de la Dordogne est un ouvrage emblématique dont la conception et la

construction ont représenté un important défi technique : estacades lourdes pour l'accès en rivière, batardeaux de grandes dimensions, pieux de gros diamètre forés sous charge de boue, construction en encorbellement pour le viaduc principal, recours à un bipoutre mixte pour les viaducs d'accès. Au terme d'un délai de travaux de trente et un mois, la construction du viaduc vient de s'achever. Après une présentation des contraintes ayant conduit au choix de conception de l'ouvrage, les spécificités de ce chantier et en particulier les méthodes sélectionnées pour sécuriser le délai de construction seront examinées.

## UNE CONCEPTION SOUS CONTRAINTES ENTRANTS DE CONCEPTION

Les contraintes ayant conduit à la conception générale du viaduc de la Dordogne sont majoritairement de trois types : hydrauliques, ferroviaires et géotechniques.

→ **Contraintes hydrauliques** : le viaduc de la ligne à grande vitesse franchit la Dordogne, soumise aux marées, en amont immédiat des deux viaducs de l'autoroute A10 dont les travées en rivière ont une portée de 100 m. Afin de limiter au maximum l'impact du nouveau viaduc sur l'écoulement de la Dordogne, les piles implantées dans

le lit mineur de la rivière ont été alignées avec celles du viaduc de l'A10 et profilées selon l'écoulement de l'eau. Cette contrainte de positionnement des appuis a conduit mécaniquement à projeter dans le lit mineur de la Dordogne des travées de 100 m de portée. Les trainées hydrauliques des piles des viaducs de l'A10 à marée montante illustrent en figure 2 l'alignement des piles des deux viaducs.

→ **Contraintes ferroviaires** : le caractère ferroviaire du viaduc contraint sa conception en termes de rigidité et de schéma statique. En effet, les critères de confort des voyageurs et de gauchissement des voies imposent un



tablier doté de rigidité longitudinale et de rigidité de torsion élevées et restreignent ainsi les choix de structure : tablier de 100 m de portée en béton précontraint coulé en place par encorbellements successifs (lit mineur), et tablier bipoutre mixte de 55 m de portée (viaducs d'approche). En outre, la voie ferrée portée par l'ouvrage limite les longueurs dilatables admissibles des tabliers à 450 m et requiert, pour de telles longueurs dilatables, des appareils de dilatation de voie installés sur des travées dites « inertes » dont le déplacement longitudinal est minimal.

→ **Contraintes géotechniques :** l'intégralité de l'ouvrage est située

**2- Alignement des piles du viaduc LGV et des viaducs de l'A10.**

**3- Estacade et premier batardeau en cours d'assemblage.**

**2- Alignment of the piers of the HSL viaduct and A10 motorway viaducts.**

**3- Jetty and first cofferdam undergoing assembly.**

dans le lit majeur de la Dordogne : des alluvions plus ou moins vasardes (sables et argiles intercalés en partie supérieure, passages sableux et/ou graveleux en partie inférieure) surmontent un substratum marneux aux caractéristiques mécaniques élevées. Ce substratum marneux est légèrement altéré en partie supérieure, et comporte des poches sableuses. Le toit du substratum marneux est rencontré entre 12 m de profondeur sur les berges et 27 m de profondeur au centre de la rivière. Ainsi, les caractéristiques médiocres des terrains superficiels et la profondeur du substratum marneux ont-elles conduit à fonder

l'ouvrage sur pieux. Pour les mêmes raisons, les remblais d'accès ont été réalisés après renforcement du sol en place par des inclusions rigides.

### STRUCTURE ADOPTÉE

Ces contraintes ainsi qu'une optimisation du coût des structures (équilibre du coût des fondations et des tabliers) ont conduit à découper le viaduc de 1319 m de longueur en cinq ouvrages élémentaires :

→ Sur les berges, de la culée C0 à la pile P6 et de la pile P17 à la culée C20, deux viaducs d'accès de 300 m de longueur au nord et de 135 m de longueur au sud assurent le franchissement d'une partie du lit majeur de la Dordogne au moyen d'un tablier de type bipoutre mixte béton acier. Les poutres métalliques ont une hauteur de 3,80 m et sont contreventées en partie basse par des croix métalliques permettant d'atteindre la rigidité de torsion requise. Les piles sont fondées sur 6 pieux en béton armé de 1,50 m de diamètre surmontés de semelles de 2 m d'épaisseur. Les points fixes de ces viaducs d'accès sont positionnés aux culées et les viaducs se dilatent ainsi vers la rivière.

→ En partie centrale (viaduc principal de la pile P7 à la pile P16), le franchissement du lit mineur de la Dordogne est réalisé grâce à un ouvrage en béton précontraint de 800 m de long, coulé en place par encorbellements successifs (figure 7). Le caisson en béton précontraint a une hauteur variant de 8,10 m sur pile à 5 m en travée. Il comporte des câbles de précontrainte intérieurs (fléaux et éclisses) et extérieurs. Les piles sont fondées sur 8 à 13 pieux en béton armé de 2 m de diamètre liés par des semelles de 4,50 m d'épaisseur. De manière à satisfaire la contrainte de longueur dilatable maximale, le point fixe du viaduc principal est positionné au milieu de l'ouvrage. Il est réalisé grâce à l'encastrement du tablier sur les deux piles centrales, constituant ainsi un portique. Les deux extrémités du viaduc principal se dilatent donc vers les berges.

→ À la jonction des viaducs d'accès et du viaduc principal, deux travées inertes isostatiques (P6-P7 et P16-P17) de 42 m chacune accueillent les appareils de dilatation des voies. Ces deux travées sont réalisées au moyen d'un tablier mixte béton acier structurellement identique aux viaducs d'accès. Elles sont bloquées longitudinalement à leurs deux extrémités de manière à limiter au maximum leur déplacement longitudinal. ▷



2



3





4

© MICHEL GARNIER POUR LISEA

Le contexte géotechnique complexe a en outre conduit à des fondations particulièrement importantes, représentant 24 000 m<sup>3</sup> de béton soit plus de la moitié des 44 000 m<sup>3</sup> de l'ouvrage.

Géométriquement, l'ouvrage est rectiligne en plan, et son profil en long comporte trois zones : pente constante à 2,5% pour les deux viaducs d'accès, profil parabolique pour le viaduc principal. Trois passes navigables sont libérées sous le viaduc principal,

avec une hauteur libre garantie de 14,45 m au-dessus des plus hautes eaux navigables.

#### **ENTREPRISES ET DÉLAI DE RÉALISATION**

La construction du viaduc a été réalisée par Cosea SGI dans un délai très restreint de 31 mois, de juin 2012 à décembre 2014. Afin d'assurer ce délai de construction, les méthodes originales détaillées ci-après ont été mises en œuvre.

#### **DES MÉTHODES ROBUSTES VISANT À ASSURER LE DÉLAI DE CONSTRUCTION**

L'ensemble des choix des méthodes de construction du viaduc a été réalisé dans le but de garantir l'achèvement de l'ouvrage dans un délai réduit.

Dans cette perspective, les points suivants se sont avérés cruciaux :

→ Limiter au maximum les aléas liés aux travaux en rivière, et notamment aux accès, aux batardeaux et aux pieux ;

- Garantir le délai de construction des fléaux en optimisant les transferts des équipages mobiles ;
- Optimiser la structure des viaducs d'accès et supprimer les interfaces avec les remblais d'accès.

#### **TRAVAUX EN RIVIÈRE**

De manière à sécuriser les accès aux six piles en rivière, deux estacades lourdes acceptant des grues chenillées de 200 t ont été réalisées au départ de chaque rive en maintenant en perma-



5

© PHOTO THÉRIQUE BODIN/CAMPENON BERNARD

**4- Bétonnage  
du bouchon  
de béton  
immergé.**

**5- Forage et  
bétonnage  
des pieux  
depuis un  
plateau lourd  
au-dessus des  
batardeaux.**

**4- Concreting  
the submerged  
concrete plug.  
5- Drilling and  
concreting of  
piers from a  
heavy platform  
above the  
cofferdams.**





6



7

nence une passe navigable au milieu de la rivière.

Ces estacades, dotées de rameaux déportés pour l'accès à chaque pile, ont permis de réaliser l'ensemble des travaux en conditions terrestres et donc de s'affranchir de moyens nautiques dont l'utilisation est complexe sur un site soumis aux marées. La figure 3 montre le démarrage du chantier en rivière, avec l'assemblage des deux estacades et le démarrage du premier batardeau.

**6- Exiguïté des zones de travail.**

**7- Équipages mobiles spécifiques.**

**6- Cramped work areas.**

**7- Special mobile rigs.**

Les batardeaux de grande dimensions (24,50 m x 12,50 m en plan, 16 m de hauteur d'eau maximale) ont été conçus sans ancrage dans le substratum marseux de manière à limiter les aléas de mise en fiche des palplanches. En effet, la présence de graves raides au-dessus du substratum aurait rendu complexe l'obtention d'une étanchéité correcte en pied de palplanches. Ainsi, un bouchon de béton immergé connecté aux gaines de forage des pieux a été réalisé pour assurer l'étan-

chéité en fond de batardeau (figure 4). Ce choix s'est avéré efficace sur la majorité des appuis, bien que la réalisation d'un bouchon de béton immergé de qualité ait été ponctuellement la source de difficultés.

Enfin, les pieux ont été réalisés sous charge de boue au moyen d'une foreuse classique sur porteur.

Ce choix, dicté par la présence de poches sableuses dans le substratum marseux, a permis d'éviter tout effondrement des parois de forage et de garantir la propreté des fonds de pieux, conduisant ainsi à éviter tout désordre sur les pieux. L'accès de la foreuse au droit de chaque pieu a requis l'assemblage, au-dessus de chaque batardeau, d'un plateau provisoire qui a permis de travailler en conditions terrestres (figure 5), et ainsi d'optimiser la durée de réalisation des pieux. Ce plateau a en outre facilité l'accès au droit des pieux pour réaliser les auscultations et s'est avéré un excellent investissement. Les travaux de réalisation des fondations des piles en rivière ont été réalisés dans l'ordre suivant :

- Battage des batardeaux ;
- Terrassement du fond des batardeaux ;
- Mise en fiche de tubages métalliques pour la réalisation des pieux ;
- Installation d'un plateau de travail au-dessus des batardeaux ;
- Forage et le bétonnage des pieux depuis ce plateau de travail, en conditions terrestres ;
- Bétonnage d'un bouchon de béton immergé connecté aux gaines de forage des pieux ;
- Mise à sec des batardeaux par pompage ;
- Recépage des pieux et la réalisation des semelles ;
- Montage d'une grue à tour pour chaque pile en rivière, la grue étant ancrée directement sur la semelle et permettant de réaliser l'ensemble des travaux restant pour chaque pile : fût et chevêtre, voussoir sur pile, fléau construit en encorbellement et clavages avec les fléaux voisins.

Les piles, les voussoirs sur piles et les fléaux, construits au moyen de coffrages métalliques spécifiques, ont été de même réalisés depuis les estacades, en conditions terrestres malgré l'exiguïté des zones de travail.

La figure 6 présente une vue d'ensemble de l'estacade rive droite à la fin de la construction des voussoirs sur piles, et illustre ainsi l'environnement contraint des rameaux de travail. ▷





8

© PHOTOTHÈQUE DODIN CAMPENON BERNARD

### TABLIER CONSTRUIT EN ENCORBELLEMENT ET TRANSFERTS D'ÉQUIPAGES

Les huit fléaux du viaduc principal ont été bétonnés en place au moyen de deux paires d'équipages mobiles spécifiques (figure 7).

Ces fléaux étant très courts (12 paires de voussoirs au maximum), le temps dévolu aux transferts des équipages mobiles du fléau achevé au fléau suivant s'est avéré crucial pour la tenue du planning.

De manière à optimiser ces transferts, tant en termes de durée qu'en termes de sécurité du personnel, une solution originale de berceau d'assemblage et de transport des équipages mobiles associé à une charpente de hissage a été développée.

Cette solution a consisté en la conception :

→ D'un berceau métallique destiné à assembler un équipage mobile complet, y compris sa poutre transversale en cé. Ce berceau repose sur un ponton assemblé à partir de caissons CMR et manœuvré au moyen d'un pousseur. Il peut ainsi être positionné contre les piles, en position de hissage et de descente des équipages mobiles ;

→ D'une charpente de hissage positionnée sur les voussoirs sur piles, en porte-à-faux au-dessus des équipages mobiles. Cette charpente comporte deux bras parallèles à l'axe du viaduc, supportant un chariot de hissage et de ripage. L'ensemble permet ainsi de hisser l'équipage mobile complet au moyen de vérins avaleurs de câbles, de le positionner devant le voussoir

sur pile, puis de le ripper vers la pile et ainsi de l'enfiler sur le voussoir sur pile (figure 8). Cette manœuvre présente un avantage certain en termes de rapidité puisque le transfert de deux équipages mobiles complets peut être réalisé en une semaine, et en termes de sécurité puisqu'aucune opération n'est à réaliser sous les encorbellements du tablier lors de la mise en place des équipages mobiles sur les voussoirs sur piles.

### VIADUCS D'ACCÈS : UNE STRUCTURE OPTIMISÉE ET DES INTERFACES RÉDUITES

La charpente métallique des viaducs d'accès a été conçue de manière à optimiser le planning général de l'ouvrage selon les principes suivant :

→ Utilisation de contreventements métalliques en partie inférieure des

**8- Hissage d'un équipage mobile complet et enfilage sur le voussoir sur pile.**

**9- Grutage d'un tronçon de poutre à sa position définitive.**

**8- Hoisting a complete mobile rig and placing on a segment on pier.**

**9- Crane handling of a beam section to its permanent position.**

poutres longitudinales en remplacement des classiques dalles en béton armé clavées aux semelles inférieures. Ce choix permet d'achever le contreventement inférieur en même temps que la charpente métallique, de s'épargner la réalisation du clavage des dalles inférieures après le bétonnage du hourdis supérieur et ainsi d'optimiser le délai global de réalisation de l'ouvrage.

→ Déconnexion des diaphragmes du hourdis supérieur. Cette disposition permet de ménager un espace de 70 cm entre les diaphragmes et la sous-face du hourdis supérieur et simplifie nettement le bétonnage du hourdis supérieur au moyen d'un plateau central.

→ Assemblage de la charpente métallique à sa position définitive (figure 9). En effet, les remblais d'accès à l'ouvrage ont été réalisés sur inclusions rigides du fait de la qualité médiocre des terrains superficiels. La mise en fiche des inclusions a nécessité une durée importante incompatible avec une solution classique d'assemblage de la charpente métallique des viaducs d'accès à l'arrière des culées puis de poussage. Ainsi, l'assemblage en place de la charpente métallique par grutage d'éléments, rendu possible par la faible hauteur du viaduc a-t-il permis d'assurer la construction de la charpente malgré l'absence de plateformes de poussage à l'arrière des culées.

Enfin, un platelage a été réalisé sous la totalité des viaducs d'accès de manière à assurer un accès simple et sécurisé pour l'assemblage des contreventements inférieurs et la réalisation des reprises de peinture (figure 10).



© MICHEL GARNIER POUR LISEA

9



## CONCLUSION

Le viaduc de la Dordogne, réalisé dans un contexte contraint et dans un délai restreint, a fait appel à des choix de conception et de construction robustes et innovants. Ces choix ont permis de réaliser les travaux en un temps réduit tout en assurant la sécurité du personnel et en garantissant un haut niveau de qualité. □

**10- Platelage de travail sous les poutres des viaducs d'accès.**

**10- Work decking under the beams of the access viaducts.**

## PRINCIPALES QUANTITÉS

- 1 319 m** de longueur
- 15 828 m<sup>2</sup>** de tablier
- 44 000 m<sup>3</sup>** de béton dont 24 000 m<sup>3</sup> dans les fondations
- 6 200 t** d'armatures passives
- 570 t** d'armatures de précontrainte
- 2 200 t** de charpente métallique pour les viaducs d'accès
- 6 100 t** d'outils métalliques spécifiques

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRE D'OUVRAGE :** Lisea
- CONSTRUCTEUR :** Cosea-SGI
- CONCEPTEUR :** Cosea-SGC
- ÉTUDES D'EXÉCUTION DU VIADUC PRINCIPAL :** Vinci Construction Grands Projets (DIMIT)
- CONTRÔLE EXTERNE DES ÉTUDES DU VIADUC PRINCIPAL :** Vinci Construction France
- CONTRÔLE EXTÉRIEUR :** Cosea - DPR
- ÉTUDES D'EXÉCUTION DES VIADUCS D'ACCÈS :** Secoa
- CONTRÔLE EXTERNE DES ÉTUDES DES VIADUCS D'ACCÈS :** Dodin Campenon Bernard (CBDI)
- SOUS-TRAITANT PIEUX ET BATARDEAUX :** Emcc / Botte Fondations
- SOUS-TRAITANT CHARPENTE MÉTALLIQUE :** Baudin Châteauneuf
- SOUS-TRAITANT PRÉCONTRAÎTE :** Freyssinet
- FOURNISSEUR DES ÉQUIPAGES MOBILES :** Coffrage&quipage

## ABSTRACT

### DORDOGNE VIADUCT - A CONSTRAINED SITE AND COMPLETION TIME

ROMAIN NICOLAS, DODIN CAMPENON BERNARD

**The Dordogne viaduct**, 1319 metres long, consists of a main viaduct in prestressed concrete built by the balanced cantilever method and two access viaducts of composite concrete-steel structure. Given its complex location site, the construction methods used were specially chosen to comply with a tight 31-month schedule. The use of a heavy jetty for river access, the design of the cofferdams, the pile drilling method, the use of a frame for hoisting mobile rigs and optimisation of the steel structure helped to comply with the construction completion time. □

### VIADUCTO DEL DORDOÑA - UN EMPLAZAMIENTO Y UN PLAZO SOMETIDOS A EXIGENCIAS

ROMAIN NICOLAS, DODIN CAMPENON BERNARD

**El viaducto del Dordoña**, con una longitud de 1.319 m, está formado por un viaducto principal de hormigón pretensado construido por voladizos sucesivos y dos viaductos de acceso en estructura mixta hormigón-acero. Para su implantación en un emplazamiento complejo fue necesario recurrir a métodos de construcción específicamente elegidos para respetar un reducido planning de 31 meses. El recurso a una estacada pesada para los accesos al río, el diseño de las ataguías, el método de perforación de los pilotes, la utilización de una estructura de elevación de los equipos móviles e incluso la optimización de la estructura metálica, contribuyeron al respeto del plazo de construcción. □





1

© PHOTOTHÈQUE LISEA, LILIAN MAROLLEAU

# L'ESTACADE DU MARAIS DE LA VIRVÉE

AUTEURS : JEREMY CATTET, INGENIEUR, EGIS JMI - ALEXANDROS GIANNOPOULOS, INGENIEUR, EGIS JMI - NABIL YAZBECK, CHEF DE PROJET, EGIS JMI - GILLES CAUSSE, DIRECTEUR ADJOINT, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS

L'ESTACADE OU VIADUC DU MARAIS DE LA VIRVÉE EST UN OUVRAGE DE TYPE PONT-DALLE DONT LES TABLIERS, QUI PRÉSENTENT LA PARTICULARITÉ D'ÊTRE ENCASTRÉS SUR LEURS APPUIS, SONT CONSTRUITS SELON LA TECHNIQUE DITE DES POUTRES-DALLES. IL SUPPORTE LES DEUX VOIES DE LA LGV SEA DANS LA ZONE OU CELLE-CI FRANCHIT LE VERSANT NORD DE LA VALLÉE DE LA DORDOGNE, ENTRE L'ESTACADE DE LA FALAISE ET LES TRAVÉES D'ACCÈS AU GRAND VIADUC SUR LA DORDOGNE. LE MARAIS DE LA VIRVÉE PRÉSENTE UN INTÉRÊT ENVIRONNEMENTAL MAJEUR ET CONSTITUE UNE ZONE FORTEMENT CONTRAINTÉ À TOUS POINTS DE VUE : HYDRAULIQUE, GÉOTECHNIQUE ET SISMIQUE.

## CONTEXTE GÉNÉRAL

Le viaduc du marais de la Virvée est situé sur le territoire de la commune de Cubzac-les-Ponts, dans le département de la Gironde. Il est implanté à une centaine de mètres en amont du tracé de l'autoroute A10, dans le marais de la Virvée, entre l'estacade de la Falaise et les travées d'accès nord au viaduc sur la Dordogne (figures 2 et 3). Dans le projet initial, il était prévu d'édifier, comme pour l'autoroute A10

voisine, un remblai continu entre l'estacade de la Falaise et le viaduc de franchissement de la Dordogne.

La hauteur de ce remblai était de 3,50 m environ, pour limiter les problèmes de stabilité liés à la très forte compressibilité des sols de la vallée de la Dordogne.

À l'issue de la phase de concertation, et pour tenir compte de la demande des services de l'État (DREAL sur avis du CNPN - Conseil National de Protection

**1- Fin de bétonnage du tablier C0-P7, poutres préfabriquées du tablier P8-C14 en place.**

**1- Completion of concreting of the C0-P7 deck, prefabricated beams of the P8-C14 deck in place.**

de la Nature), le remblai a été interrompu par un nouveau viaduc dont la longueur a été fixée à 150 m. Ceci contribue notamment à la transparence écologique et évitera, à terme, la désertification de la zone entre l'autoroute A10 et la LGV.

Il constitue aussi un ouvrage de contrôle des crues de la Dordogne, en maintenant la plus grande possible la zone de stockage des eaux que constitue le marais.

2- Les estacades de la Falaise et de la Virvée et, en arrière-plan, le viaduc sur la Dordogne.

3- Profil en long et vue en plan du tracé de la LGV sur le versant nord de la vallée de la Dordogne.



© P. LE DOMÉ 2

2- The Falaise and Virvée jetties and, in the background, the viaduct over the Dordogne.

3- Longitudinal profile and plan view of the HSL alignment on the northern slope of the Dordogne valley.

**DONNÉES ET CONTRAINTES LIÉES AU SITE**

**HYDRAULIQUE**

Au niveau du passage de la future LGV SEA, le lit mineur de la Dordogne est bordé par 4 km de digues qui, en temps normal, contiennent les crues venues de l'amont ainsi que les fortes marées.

Cependant, lorsque se conjuguent les effets de précipitations abondantes sur le bassin versant, d'une marée de grande amplitude et d'un violent vent

d'ouest comme ce fut le cas lors des grandes tempêtes de 1999, 2009 et 2010, l'eau passe par-dessus les digues et se déverse dans la plaine alluviale jusqu'au pied du versant nord. Ces inondations sont de courte durée car la plaine est quadrillée par un réseau de drainage qui permet de rejeter les eaux dans la Dordogne à marée basse quand le niveau du lit mineur est redescendu sous celui de la nappe d'inondation. Les exutoires de ce réseau sont munis d'une porte

à flot qui s'ouvre et se ferme automatiquement en fonction de la différence de niveau entre l'aval et l'amont.

La cote maximale des eaux atteinte sur le site dans de telles circonstances est estimée à 3,85 NGF, dans le cas où les digues submergées résistent à l'érosion et à la poussée des eaux du lit mineur.

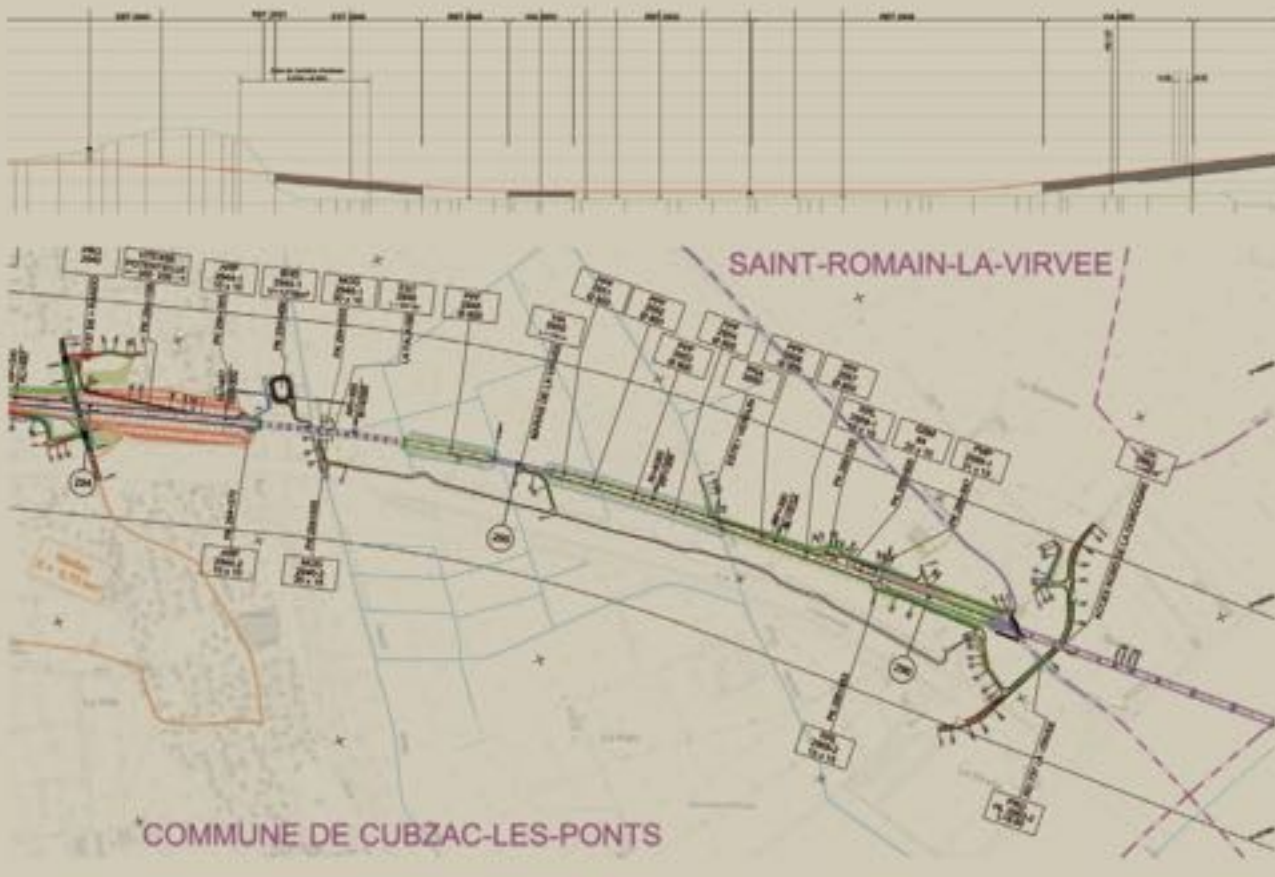
La longueur du viaduc est telle que sa présence n'a pas d'effet sur les conditions de ressuyage des inondations. La vitesse de l'écoulement reste très faible, il n'y a pas de risque d'affouillement des piles non plus que de risque d'embacle.

**GÉOTECHNIQUE**

Le substratum dans lequel est creusée la vallée de la Dordogne est constitué de molasses d'époque tertiaire. Il s'agit d'alternances de marnes, marno-calcaires, sables et grès contenant tous une proportion significative d'argile. Dans la plaine, le toit du substratum molassique compact, dans lequel doivent s'ancrer les fondations du viaduc, a été reconnu à environ 25 m sous le niveau du terrain naturel.

**PROFIL EN LONG ET VUE EN PLAN DU TRACÉ DE LA LGV**

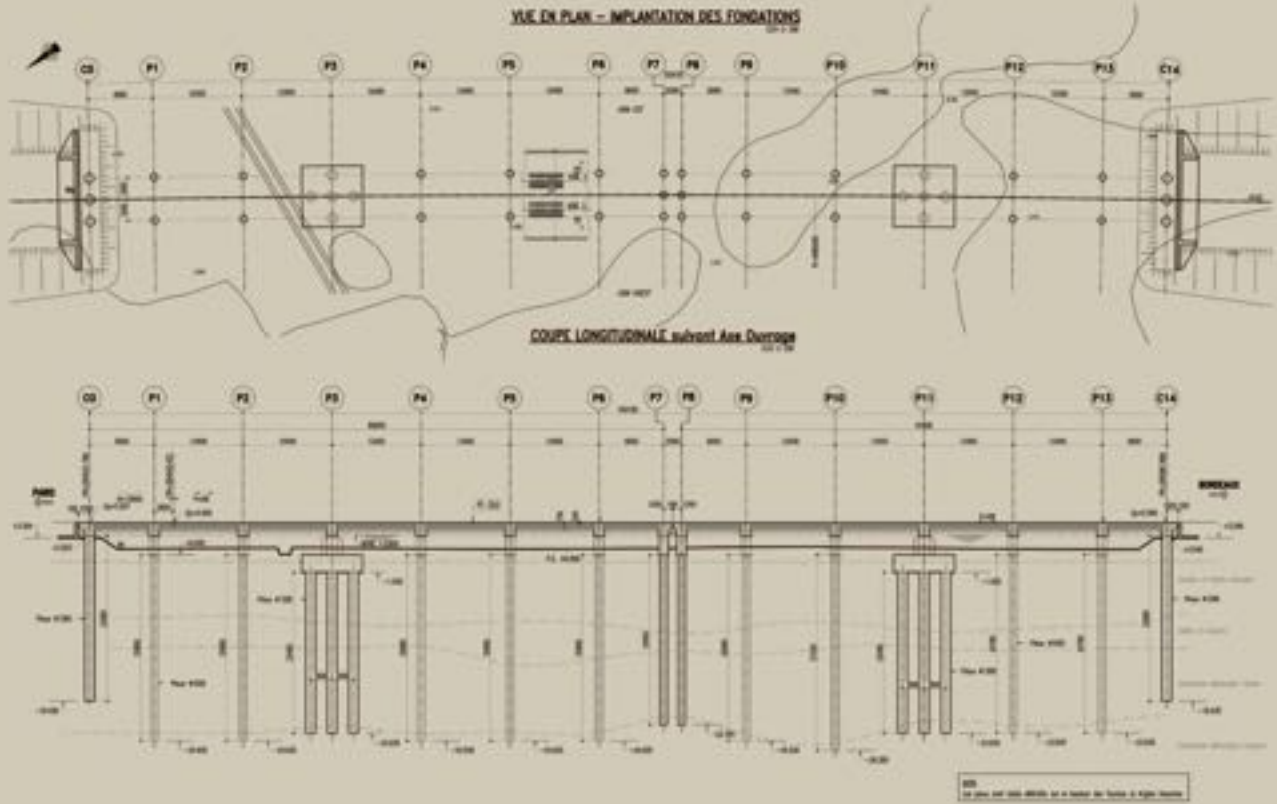
sur le versant nord de la vallée de la Dordogne



© EGIS 3



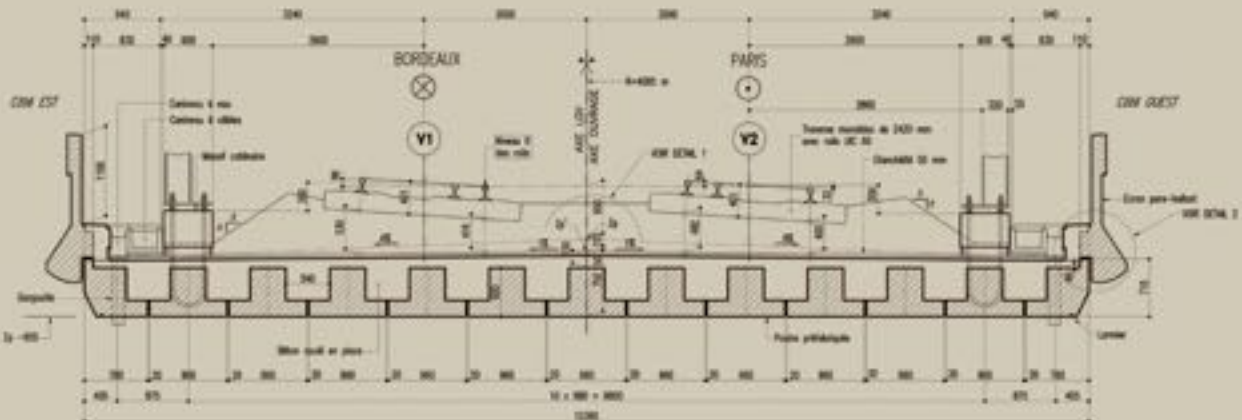
VUE EN PLAN ET COUPE LONGITUDINALE DE L'OUVRAGE, PROFIL EN LONG GÉOTECHNIQUE



4

© EGIS

COUPE TRANSVERSALE DU TABLIER



5

© EGIS

Les résultats des sondages géotechniques ont mis en évidence la succession de sols suivante (figure 4) :

→ Des alluvions de surface tourbeuses et argilo-vasardes rencontrées à partir du TN sur une épaisseur de 10 à 12 m. Très compressibles et de caractéristiques mécaniques très faibles, elles sont composées en tête d'une croûte de limon et tourbe de teinte marron noir sur une épaisseur de l'ordre du mètre, qui recouvre 2 à 3 m de tourbes argileuses imbibées

d'eau, surplombant 7 m d'argiles vasardes très molles et très perméables ;

→ Des alluvions anciennes, sableuses ou graveleuses, de teinte grisâtre, sur une épaisseur variant de 2,5 à 6 m ;

→ Le substratum molassique tendre sur une épaisseur de 9 à 14 m, constitué d'une alternance de lentilles d'argile plus ou moins sableuses, silteuses et marneuses, de bancs calcaires et même de lentilles sableuses ;

**4- Vue en plan et coupe longitudinale de l'ouvrage, profil en long géotechnique.**

**5- Coupe transversale du tablier.**

**4- Plan view and longitudinal section of the structure, geotechnical longitudinal profile.**

**5- Cross section of the deck.**

→ Le substratum molassique compact constitué de marmo-calcaires plus indurés mais également de sables argilo-gréseux.

**SISMICITÉ**

La commune de Cubzac-les-Ponts se situe en zone de sismicité dite faible. L'ouvrage est classé en catégorie d'importance III.

Cela conduit à considérer une accélération maximale de référence au niveau du sol de  $a_{gr} = 0,7 \text{ m/s}^2$  couplée à un coefficient d'importance



6- Ensemble des appuis juste après leur réalisation.

7- Coupes sur piles courantes, piles d'extrémité et piles fixes.

6- All the supports just after their completion.

7- Cross sections on standard piers, end piers and fixed piers.

$\gamma_1 = 1,2$ , soit une accélération de calcul  $a_0 = 0,84 \text{ m/s}^2$ .

Sur la base des valeurs moyennes de vitesses de propagation  $V_s$  mesurées sur site, tous les appuis de l'ouvrage pourraient être considérés de classe D au sens de l'article 3.1 de l'EN 1998-1. Le critère déterminant est alors l'épaisseur de la couche d'argiles plastiques molles et de matériaux lâches recouvrant le substratum ; si celle-ci est supérieure à 10 m, la classe à considérer pour l'appui concerné est la classe S1. Les classes sismiques de sol suivantes ont été retenues :

→ **D pour le séisme longitudinal :**

Les déplacements longitudinaux du tablier sont bloqués sur les piles fixes P3 et P11. Celles-ci sont fondées sur cinq pieux ancrés dans le substratum, par l'intermédiaire d'une semelle de répartition. Pour ces deux appuis, la classe de sol se définit à partir de la base de la semelle. L'épaisseur des matériaux lâches (mesurée à partir de la sous-face de la semelle) étant inférieure à 10 m, la classe de sol à considérer est donc la classe D.

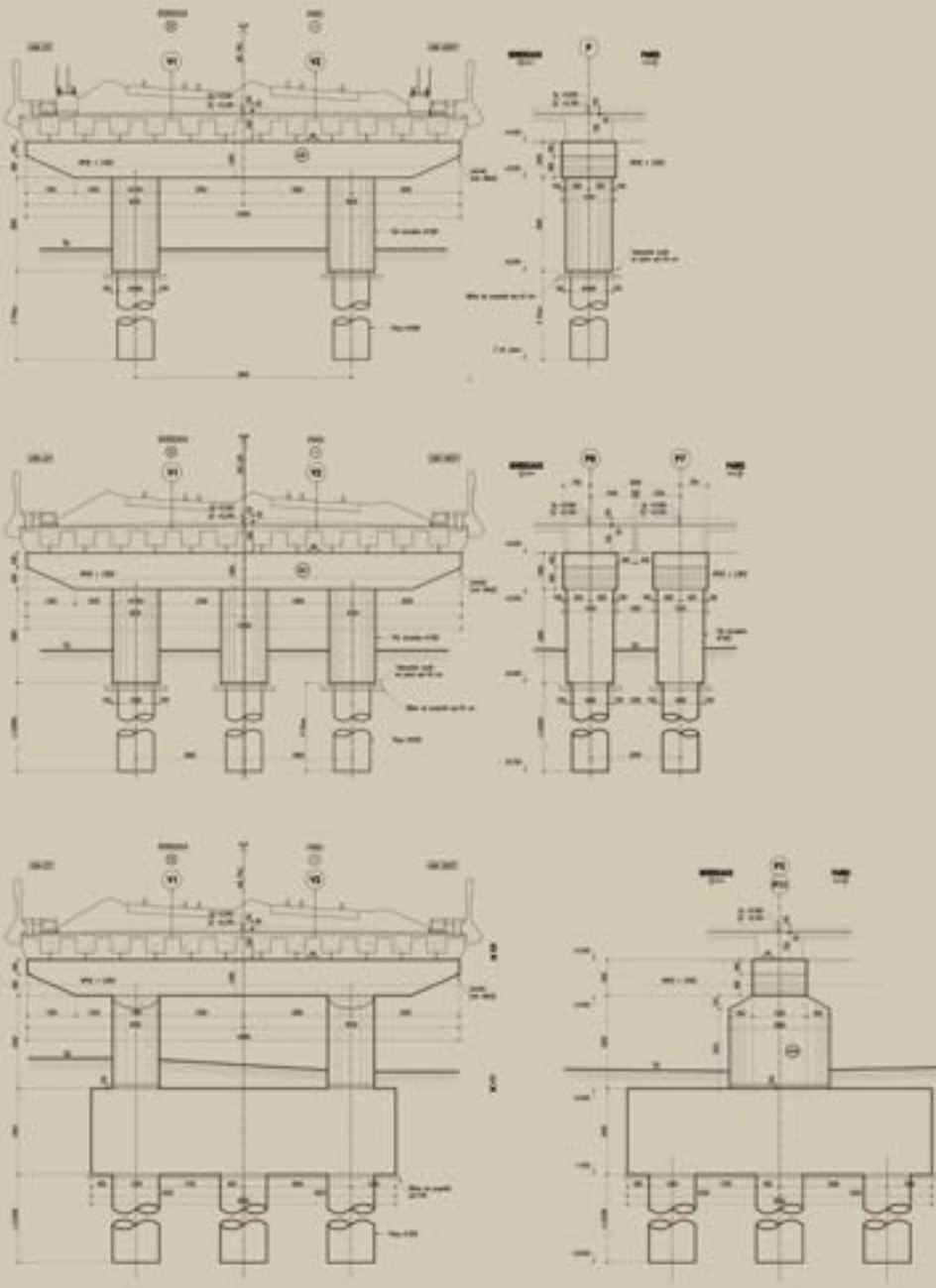
→ **S1 pour le séisme transversal :**

Les déplacements transversaux du tablier sont bloqués sur toutes les lignes d'appui. Mis à part P3 et P11, les autres appuis sont fondés sur des pieux-colonnes souples sans semelle de transition. La classe de sol se définit donc pour eux à partir du terrain naturel. L'épaisseur des matériaux lâches étant supérieure à 10 m, la classe de sol à considérer est donc la classe S1.

Le spectre de réponse élastique pour la composante longitudinale de l'action sismique est construit à partir du spectre normalisé proposé par l'Eurocode 8 pour la classe de sol D.

Pour la classe de sol S1, il n'existe pas de spectre normalisé. Une étude spécifique de réponse du site a donc été confiée à Géodynamique et Structures, pour déterminer le spectre de réponse élastique pour la composante transversale de l'action sismique. Elle a consisté en une simulation numérique unidimensionnelle de propagation d'ondes à partir d'accélérogrammes synthétiques, dérivés d'accélérogrammes naturels, représentatifs du substratum (sol de classe B) en zone de sismicité faible, pour un ouvrage de catégorie d'importance III. Le spectre de réponse élastique ainsi déterminé propose une accélération au plateau de 0,6 g, à comparer à 0,34 g pour une classe de sol D.

COUPES SUR PILES COURANTES, PILES D'EXTRÉMITÉ ET PILES FIXES



© PHOTO THÉQUE LISEA, MICHEL GARNIER

© EGIS



### SOLUTION RETENUE

Le profil en long de la ligne a été abaissé au maximum dans cette portion du tracé, afin de limiter la hauteur des remblais. Au droit du viaduc, le niveau du profil en long ( $Z_{PL}$ ) est calé à la cote 5,50 NGF, pour maintenir une garde minimum vis-à-vis des crues centennales. La cote maximale des eaux atteinte sur le site, estimée à 3,85 NGF, imposait de concevoir un ouvrage à tablier de faible épaisseur, pour ne pas engager le gabarit hydraulique. La solution retenue consiste en un ouvrage en béton armé de type pont-dalle continu (figure 5) et permet de répondre à cette contrainte, l'épaisseur du tablier pouvant être limitée à 75 cm pour des portées de l'ordre de 12 m. La seconde contrainte était la nécessité de disposer les appareils d'appui en tête de piles hors d'eau, pour garantir leur bon fonctionnement et leur pérennité. Or, même en limitant l'épaisseur du tablier à 75 cm, la sous-face de ces appareils, compte

tenu de leur encombrement, serait calée quasiment au niveau des plus hautes eaux. C'est pourquoi la solution retenue est d'encaster le tablier directement sur ses piles, évitant ainsi la mise en œuvre d'appareils d'appui qui n'auraient pas été conformes aux exigences usuelles.

La longueur totale de l'ouvrage étant de 150 m, il aurait été possible, en disposant le point fixe sur une pile centrale, de limiter la longueur dilatable à 75 m, valeur inférieure à la limite de 90 m fixée par le Référentiel ; le ballast et les rails pouvaient alors le franchir sans coupure à ses extrémités. L'ouvrage a néanmoins été fractionné en deux modules indépendants, respectivement de 80 m et 67,60 m entre axes d'appuis C0 et P7, et P8 et C14, séparés par un joint de dilatation ; ceci afin de limiter les déplacements imposés par le tablier à ses appuis et fondations sous l'effet des variations de température, du fait du schéma statique retenu.

La travure retenue est la suivante : [9 m - 5 x 12,40 m - 9 m] - 2,50 m - [9 m - 4 x 12,40 m - 9 m]

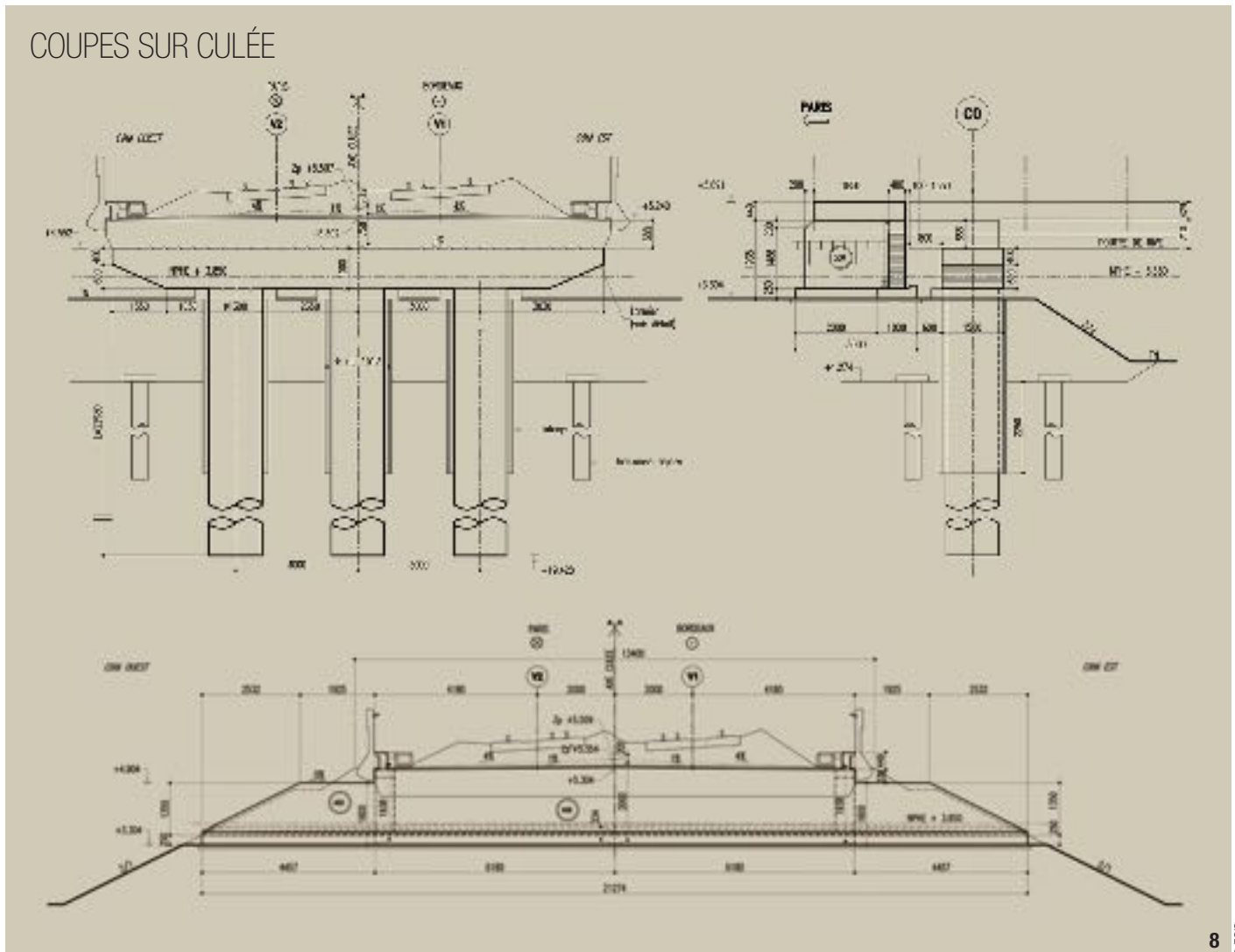
Les tabliers sont constitués de poutres préfabriquées selon la technique dite des poutres-dalles. Des poutres en béton armé (compte tenu des portées limitées, la précontrainte n'est pas nécessaire), de section caractéristique en T inversé et de dimensions modestes, préfabriquées en usine, sont d'abord posées à la grue les unes à côté des autres sur des chevêtres transversaux prévus à cet effet en tête de piles. Elles sont ensuite solidarisées par des entretoises coulées en place aux extrémités des travées, et par un béton de seconde phase venant

reconstituer une dalle monolithique. Cette technique présente de nombreux avantages :

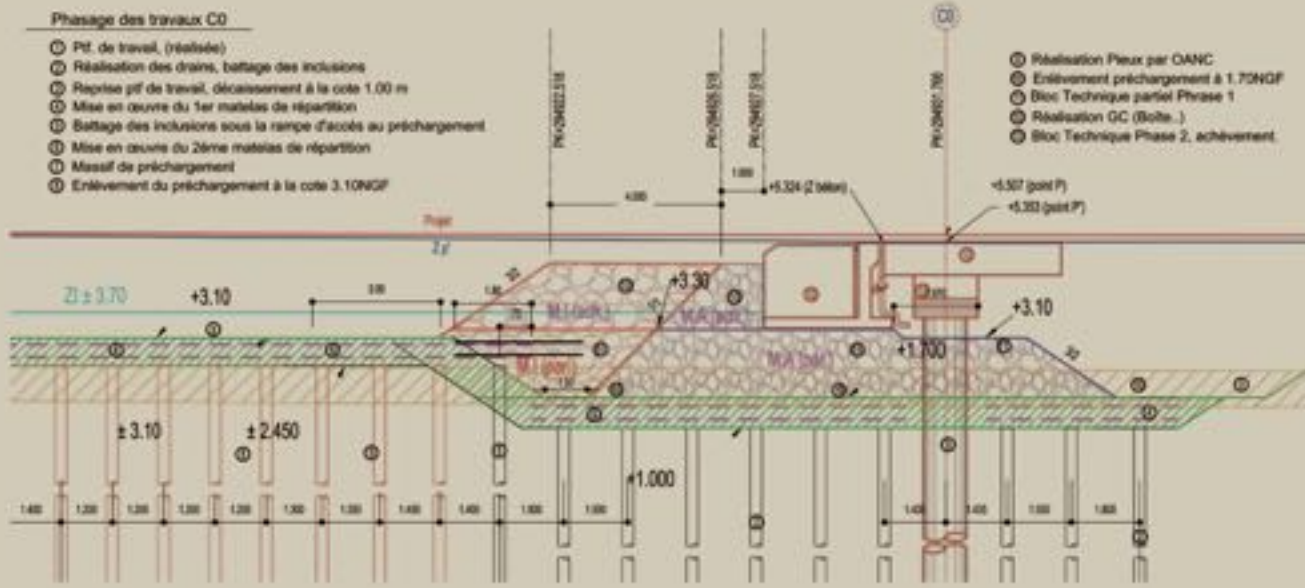
- Faible épaisseur des tabliers (0,75 m) compte tenu des faibles portées, donc transparence accrue, alors que le profil en long est très proche du sol,
- Industrialisation : les poutres sont produites et stockées hors du site. Leur préfabrication à haute cadence n'est pas critique vis-à-vis du délai d'achèvement de l'estacade. Comme elles sont légères et peu encombrantes, il est relativement facile de les acheminer par la route jusqu'au site des travaux ;
- Simplicité et rapidité d'exécution : les poutres peuvent être posées par une grue automotrice facilement déplacée d'une travée à l'autre ; une piste assez sommaire suffit pour les approvisionner. Le béton de remplissage entre poutres est coulé directement sur les talons de celles-ci ; il n'est

8- Coupes sur culée.

8- Abutment cross sections.



BLOC TECHNIQUE - GÉOMÉTRIE ET PHASAGE DE RÉALISATION



© EGIS 9

**9- Bloc technique - Géométrie et phasage de réalisation.**

**10 & 11- Battage des inclusions rigides sous les futurs remblais d'accès au viaduc.**

**9- Technical unit - Geometry and work sequencing.**  
**10 & 11- Pile driving of rigid inclusions under the future viaduct access embankments.**



© PHOTO THÈQUE LISEA, JULIAN MAROLLEAU

pas nécessaire de recourir à des outils coffrants ou à des coffrages perdus.

Vis-à-vis des charges verticales, les tronçons de tablier ont le schéma statique d'une poutre continue encadrée sur des colonnes verticales, c'est-à-dire d'une succession de portiques solitaires.

Dans le plan horizontal, leurs déplacements sont bloqués :

- Suivant la direction perpendiculaire à l'axe du tablier, sur toutes les files d'appuis ;
- Suivant l'axe du tablier, sur les piles P3 et P11, qui constituent du fait de leur rigidité relative importante les points fixes de chacun des deux tronçons vis-à-vis des

efforts horizontaux de freinage et démarrage des trains.

Les piles sont de faible hauteur, elles se décomposent en quatre familles (figures 6 et 7) :

- Les piles courantes, constituées de deux fûts circulaires de diamètre 1,30 m, reposant chacun sur un pieu Ø1000 sans semelle de répartition intermédiaire ;
- Les piles d'extrémité P7 et P8, disposées de part et d'autre du joint séparant les deux modules de tablier, constituées de trois fûts circulaires de diamètre 1,30 m, reposant chacun sur un pieu Ø1000. Le troisième fût permet de rigidifier ces appuis dans le sens transversal, et ainsi de limiter les

déplacements transversaux différentiels entre les deux modules, sous sollicitations sismiques, à des valeurs acceptables par la voie ;

- Les piles fixes P3 et P11, constituées de deux fûts de section 1,80 x 1,30 m dont les petits côtés sont des demi-cercles, appuyés sur une semelle de fondation supportée par 5 pieux Ø1270 ;
- Les piles culées C0 et C14, constituées d'un chevtre transversal reposant sur trois pieux Ø1270, forés à partir du remblai technique à travers une virole métallique. Le sur-diamètre de cette virole libère un vide supérieur aux déplacements horizontaux maximaux qu'est susceptible de subir le

pieu qui la traverse : ainsi aucun effort horizontal n'est transmis par l'ouvrage à ses blocs techniques constitués de matériaux relativement rigides.

La fonction de garde-grève est assurée par une boîte en béton armé noyée dans la grave traitée qui constitue le massif d'appui du bloc technique. Cette boîte est composée d'un radier, d'un mur de front et de deux murs en retour en rives de la plateforme.

Le mur de front est prolongé latéralement par des murs de soutènement de hauteur variable, qui retiennent les talus des remblais contigus à l'ouvrage. Ainsi, les fonctions de garde-grève et de fondation de l'ouvrage sont totalement dé-corrélées (figure 8).



Compte tenu de la très forte compressibilité des dix mètres de sol supérieurs dans le marais, les blocs techniques et leurs remblais contigus sont édifiés, après pré-chargement et drainage des tourbes vasardes, sur des inclusions rigides battues transmettant les charges au substratum (figures 9, 10 et 11). Le réseau ainsi mis en place permet de limiter le tassement du bloc technique à des valeurs inférieures au centimètre fixé par le Référentiel Technique.

Conformément aux dispositions de l'annexe 16 de l'IN3278, le massif d'appui du bloc technique présente une hauteur de 3 m. Il repose sur les inclusions rigides par l'intermédiaire d'un matelas de répartition en gravier, d'une épaisseur de 70 cm.

### ÉTUDE SOUS SOLLICITATIONS SISMQUES

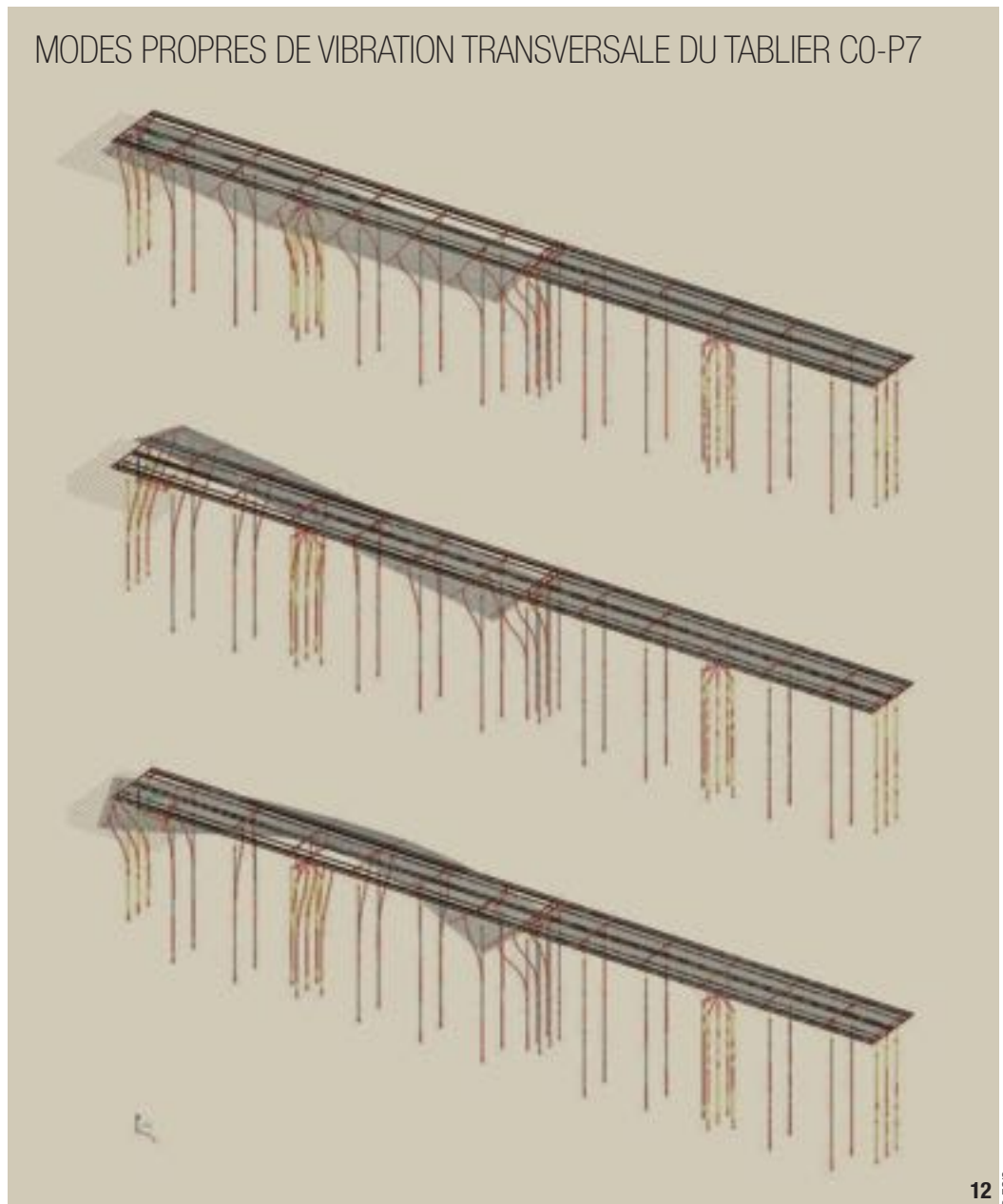
La conception des fondations de l'ouvrage a été essentiellement dictée par des considérations sismiques, notamment pour les appuis C0/C14, P7/P8 et P3/P11, pour lesquels le séisme transversal est dimensionnant.

Au démarrage des études de conception, l'option envisagée était de se limiter à l'usage d'un diamètre unique Ø1000 pour l'ensemble des pieux de fondation, dans un souci d'optimisation des méthodes de construction. Il était donc initialement prévu de fonder :

- Les appuis fixes P3 et P11 sur une semelle de répartition reposant sur  $3 \times 3 = 9$  pieux Ø1000,
- Les piles culées C0 et C14 sur 3 pieux Ø1000.

Les premières études du comportement sismique de l'ouvrage avec ces fondations ont montré que la raideur des appuis fixes dans le sens transversal était trop importante par rapport à celle des appuis courants. Les modes propres prédominants de la structure étaient des modes de type "hélicoptère" ou "banane" (figure 12), conduisant à une sollicitation (et par conséquent à un ratio d'armatures) trop importante des pieux des appuis fixes et des appuis d'extrémité des deux tabliers. On a alors recherché une solution permettant :

- D'assouplir les fondations des points fixes dans le sens transversal, de manière à augmenter les périodes propres des modes mobilisant l'ouvrage dans cette direction, et donc à réduire les efforts. Pour cela, on a cherché à limiter l'effet de portique transversal dans



12 © EGIS

les fondations de ces deux appuis en disposant autant que possible les pieux dans l'axe de l'ouvrage ;

→ Tout en conservant une raideur suffisante de ces appuis dans la direction longitudinale, de manière à ce qu'ils jouent effectivement leur rôle d'appuis fixes et que le déplacement longitudinal des tabliers sous les efforts de freinage et démarrage des trains reste admissible par la voie (i.e. inférieur à la limite de 5 mm fixée par les Eurocodes). Le ballast et les rails peuvent alors franchir l'ouvrage sans coupure à ses extrémités et on s'affranchit ainsi de la mise en œuvre d'appareils de dilatation des voies.

La solution retenue consiste à fonder les piles fixes sur 5 pieux Ø1300 (les

**12- Modes propres de vibration transversale du tablier C0-P7.**

**12- Natural modes of transverse vibration of the C0-P7 deck.**

pieux Ø1270 constituent une variante d'exécution).

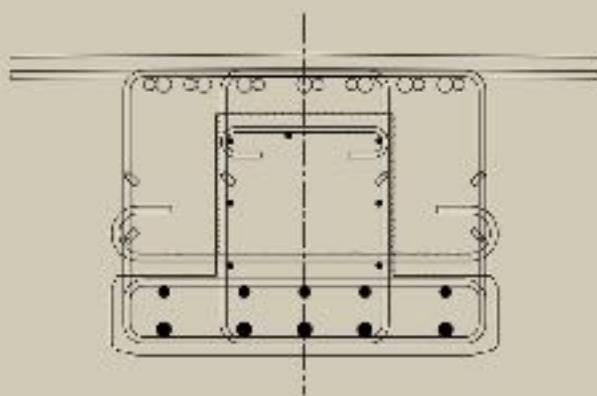
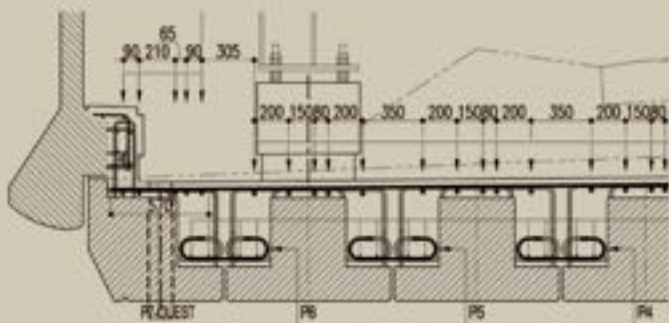
Le calcul a montré que cette solution permet une meilleure répartition des efforts sismiques transversaux dans les appuis, avec une prédominance des modes de déplacements transversaux d'ensemble des deux tabliers.

Les modes de type "hélicoptère" et "banane" sont décalés vers des fréquences plus élevées, ce qui permet également de réduire les déplacements - et donc les efforts - imposés aux appuis d'extrémité.

### COMPORTEMENT DYNAMIQUE SOUS CIRCULATIONS FERROVIAIRES

Dans la zone du viaduc du marais de la Virvée, la vitesse de référence de la ligne est limitée à 230 km/h. Suivant la spécification technique d'interopérabilité "infrastructures", la vitesse maximale de calcul est donc égale à  $1,2 \times 230 = 276$  km/h. L'étude de la réponse dynamique de la structure au passage des dix trains du modèle de charge HSLM-A (train

## FERRAILLAGE DU TABLIER EN ZONE COURANTE

© EGIS  
13

dynamique universel) a néanmoins été poursuivie jusqu'à 420 km/h, ce qui correspond à la vitesse de référence en section courante de la ligne (350 km/h).

Cette étude a montré que l'ouvrage conservait un comportement satisfaisant vis-à-vis des sollicitations dynamiques sous circulations à grande vitesse.

### REPRISE DE LA FLEXION TRANSVERSALE

Afin d'assurer un fonctionnement en dalle vis-à-vis des surcharges de superstructures et d'exploitation, des armatures transversales sont disposées en fibre inférieure du tablier sous forme d'aciers crossés à 180° dans la nervure des poutres préfabriquées. La continuité est assurée par la mise en place d'épingles de recouvrement. Des aciers longitudinaux disposés dans les boucles viennent enfin couter ces recouvrements (figure 13). Les faces verticales de la nervure des poutres sont recouvertes d'un grillage métallique à la préfabrication, afin de les rendre rugueuses et ainsi d'améliorer les conditions d'adhérence avec le béton de seconde phase.

**13- Ferrailage du tablier en zone courante.**

**13- Deck reinforcing bars in a standard area.**

### TOLÉRANCES D'EXÉCUTION

Le viaduc du marais de la Virvée a été dimensionné au plus juste afin de satisfaire à l'ensemble des critères ferroviaires et de résister aux efforts sismiques sollicitants.

Le calcul autorisait au maximum un défaut d'implantation des pieux de 10 cm et il était important que cet objectif soit tenu sur chantier, du fait de la structure des appuis souples (chevêtre encastré sur pieux-poteaux) et pour rester en conformité avec les critères de résistance des matériaux de l'Eurocode 2. Ainsi, de la précision d'implantation des pieux et de la qualité de leur réalisation dépendait à la fois le bon déroulement du chantier et l'assurance d'un ouvrage con-

forme aux exigences réglementaires. Les pieux ont été réalisés en ayant recours au procédé Starsol®.

Le forage est exécuté à la tarière continue creuse équipée d'un tube plongeur télescopique qui permet le bétonnage sous pression, augmentant la capacité frottante des pieux. Les cages d'armatures sont ensuite vibrofoncées jusqu'à atteindre leur cote finale.

La mise en place des cages d'armatures est rendue plus aisée par l'ajout d'un agent de rétention d'eau au béton. La précision d'implantation requise a été obtenue par la mise en place de tubages définitifs sur la hauteur de la couche d'alluvions modernes dont les caractéristiques mécaniques étaient trop faibles pour autoriser un forage brut. □

### CHIFFRES-CLÉS

**LONGUEUR DE L'OUVRAGE : 150,10 m (entre axes des appuis d'extrémité)**

**TRAVURE : [9,00 m - 5 x 12,40 m - 9,00 m] - 2,50 m - [9,00 m - 4 x 12,40 m - 9,00 m]**

**FONDACTIONS PROFONDES (PIEUX Ø1270 ET Ø1000) : 970 m**

**POUTRES PRÉFABRIQUÉES EN BÉTON ARMÉ : 169 u**

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE : Lisea**

**CONCEPTION : SGC - Egis JMI**

**EXÉCUTION DES TRAVAUX : SGI - Gtm Sud (Génie civil) /**

**Soletanche Bachy (Fondations) / Matière (poutres préfabriquées)**

**BUREAU D'ÉTUDES D'EXÉCUTION : Secoa**

### ABSTRACT

#### VIRVÉE SWAMP JETTY

EGIS JMI: J. CATTET, A. GIANNOPOULOS, N. YAZBECK - G. CAUSSE, VINCI

The SEA HSL was originally supposed to cross the Virvée swamp on an embankment, but environmental and hydraulic issues finally led to the design of a jetty 150 metres long. This structure is a slab bridge built by the so-called "beam-slab" technique, with reinforced concrete inverted-T beams on the underside and cast-in-situ concrete on the topside. This design makes it possible to achieve a small deck thickness and thus an optimum longitudinal profile/hydraulic transparency ratio. It also ensures great ease and speed of execution. A feature of the decks is that they are fixed on their supports to meet severe seismic and geotechnical stresses. □

#### LA ESTACADA DEL PANTANO DEL VIRVÉE

EGIS JMI: J. CATTET, A. GIANNOPOULOS, N. YAZBECK - G. CAUSSE, VINCI

Inicialmente, la línea de alta velocidad Sur Europa Atlántico debía atravesar el pantano del Virvée en terraplenado, pero las problemáticas ambientales e hidráulicas finalmente condujeron al diseño de una estacada de 150 m. de longitud. Esta estructura es un puente de losa construido según la técnica denominada de las "vigas de losa", con vigas de hormigón armado en T invertida en fibra inferior y un hormigón colado de in situ en fibra superior. Este diseño permite obtener un reducido grosor de tablero y de este modo optimizar la relación perfil longitudinal/transparencia hidráulica. También garantiza una gran sencillez y rapidez de realización. Los tableros presentan la particularidad de estar empotrados en sus apoyos para hacer frente a fuertes requisitos y sísmicos y geotécnicos. □





1

© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE CM

# LGV SEA TOURS BORDEAUX - LE TABLIER DU VIADUC DE LA VIENNE

AUTEUR : JEAN-PIERRE GERNER, DIRECTEUR DU PÔLE OUVRAGE D'ART, EIFFAGE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

LE VIADUC DE LA VIENNE SE SITUE DANS LE DÉPARTEMENT DE L'INDRE-ET-LOIRE, À NOUÂTRE. IL FRANCHIT LA RIVIÈRE DE LA VIENNE ET SUPPORTE LES DEUX VOIES DE LA LGV SEA. L'OUVRAGE LONG DE 344,50 M EST ORIENTÉ NORD-SUD. CET OUVRAGE SUPPORTE LES 2 VOIES DE LA LGV, DANS UN SECTEUR OÙ LA VITESSE DE RÉFÉRENCE EST DE 350 KM/H. LE VIADUC DE LA VIENNE EST SITUÉ EN ZONE D'ALÉA SISMIQUE FAIBLE, SELON LA NOUVELLE CARTE NATIONALE D'ALÉA SISMIQUE.

## TYPE D'OUVRAGE

### LE TABLIER

Le viaduc de la Vienne (figures 1 et 3) possède un tablier de type mixte. Sa travure est : 56,50 m - 62,50 m - 60,50 m - 58,50 m - 56,50 m - 50 m. Il est constitué de 2 PRS (poutres reconstituées soudées). Les diaphragmes sont espacés de 9,75 m à 11,30 m. Le hourdis supérieur en béton armé garde une section

constante ; il est connecté sur la membrure supérieure des poutres par des goujons Nelson®.

Les semelles supérieures des diaphragmes ont été abaissées (non connectées à la dalle) de façon à permettre la réalisation du hourdis avec un équipage mobile. Un contreventement inférieur est réalisé au moyen d'un treillis métallique. Associé à la dalle, il apporte la rigidité nécessaire en torsion.

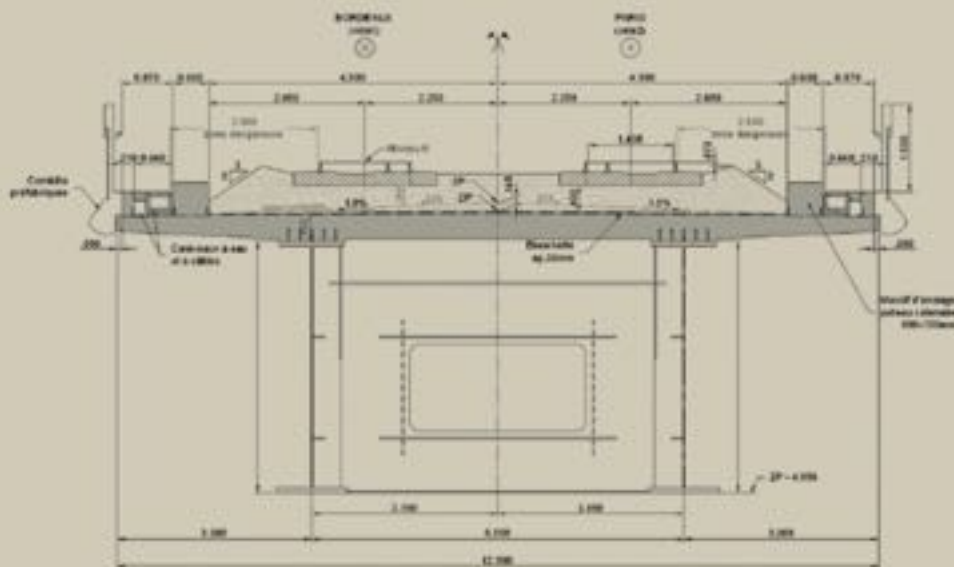
**1- Le viaduc vu depuis la culée C6.**

**1- Viaduct seen from the C6 abutment.**

L'ouvrage est équipé sur toute sa longueur d'une passerelle en caillottes installée entre les deux poutres (figure 2).

Le point fixe de l'ouvrage se trouve sur la culée C6 et l'appareil de dilatation est situé à l'arrière de la culée Nord C0. Ainsi, la distance de 344,50 m entre l'appui fixe et la culée Nord C0 reste-t-elle inférieure à la longueur dilatable maximale autorisée de 450 m.

COUPE TRANSVERSALE DU TABLIER



© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE CM

2

**LES VALEURS CARACTÉRISTIQUES DE LA CHARPENTE MÉTALLIQUE**

Les semelles inférieures des poutres principales sont de largeur constante égale à 1200 mm. L'épaisseur varie de 35 à 115 mm. Les semelles supérieures ont une largeur de 1100 mm et leur épaisseur varie de 30 à 95 mm. La hauteur des âmes varie linéairement tout le long de l'ouvrage, de 3,95 m (sur C0) à 4,20 m (sur P1) puis de 4,20 m (sur P1) à 3,50 m (sur C6). Les diaphragmes courants ont une semelle supérieure de 400 mm de large et de 30 mm d'épaisseur, une semelle inférieure de 300 mm de large et de 25 mm d'épaisseur. Les âmes des diaphragmes ont une épaisseur de 14 mm.

- 2- Coupe transversale du tablier.
- 3- Vue aérienne du viaduc.
- 4- Le dispositif de blocage longitudinal du tablier.

- 2- Cross section of the deck.
- 3- Aerial view of the viaduct.
- 4- The deck's longitudinal restraining system.

Les diaphragmes courants ne sont pas connectés à la dalle, la semelle supérieure des diaphragmes est de 700 mm plus basse que la semelle supérieure des poutres principales. Cette disposition permet de réaliser la dalle avec un équipage mobile classique. Les assemblages des poutres principales et des diaphragmes sont réalisés par soudage. Les contrôles des soudures sont réalisés aux ultrasons et par magnétoscopie. Les contreventements inférieurs sont réalisés en cornières à ailes égales de 200x200x20 mm. L'assemblage des contreventements sur les poutres principales est réalisé par boulons HR alors que l'assemblage sur les diaphragmes est réalisé par soudage.

**LES APPUIS**

**Piles**

La hauteur des piles courantes varie de 7,3 m environ pour les piles P4 et P5 hors du lit de la Vienne à 11,5 m environ pour les piles P1 à P3. Elles sont constituées d'un fût rond de diamètre 3,20 m surmonté d'un chevêtre évasé sur lequel sont placés les appareils d'appui.

Les piles sont fondées sur semelles superficielles.

Les appareils d'appui des piles sont de type appareils d'appui à pot. Chaque pile dispose :

- D'un appareil d'appui fixe transversalement et libre longitudinalement,
- D'un appareil d'appui libre transversalement et longitudinalement.

**Culées**

Les semelles des deux culées sont approximativement au niveau du terrain naturel. Elles comportent un chevêtre appuyé sur des pieux traversant les couches superficielles et ancrés dans le substratum.

Le principe des appareils d'appui sur culées est similaire à celui des piles courantes avec sur chaque culée :

- Un appui fixe transversalement et libre longitudinalement,
- Un appui libre transversalement et longitudinalement.

Sur la culée C6 (point fixe), le blocage horizontal transversal est assuré par un appareil d'appui à pot monodirectionnel.

**LE POINT FIXE LONGITUDINAL EN C6**

Le point fixe longitudinal est réalisé par un système de bielles articulées installé en bout des deux poutres principales et ancré sur la culée (figure 4). Les rotations du tablier dans le plan vertical longitudinal sont ainsi autorisées. ▷



3

© PASCAL LE DOARÉ



4

© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE CM





5



6

© PHOTO THÉQUE EIFFAGE CM



7

© PHOTO THÉQUE EIFFAGE CM

**5- Livraison des tôles à l'usine de Lauterbourg (67).**

**6- Opération de débitage.**

**7- Fabrication d'une poutre principale.**

**8- Machine de soudage automatique pour fabrication des poutres.**

**5- Delivery of plates to the Lauterbourg plant.**

**6- Cutting operation.**

**7- Manufacture of a main girder.**

**8- Automatic welding machine for girder fabrication.**



8

© PHOTO THÉQUE EIFFAGE CM

Ce dispositif est sollicité par les actions longitudinales de freinage/démarrage et sismique. Dans le cas du viaduc de la Vienne il est dimensionné pour un effort sismique de 7 500 kN.

Pour l'étude des contraintes locales générées par l'attache du dispositif de blocage (about des poutres et boîtes d'ancrage), il a été utilisé un modèle aux éléments finis en 3D finement maillé.

Le montage des axes est du type mécanique avec des tolérances serrées. Toutes les pièces ont fait l'objet d'un usinage.

Chaque dispositif est réalisée par :

→ Un épaissement local de l'âme des poutres principales en bout

d'ouvrage (épaisseur 90 mm). Cette conception permet par ailleurs de réduire le raidissement local de la zone d'appui ;

→ Deux plats de liaisons d'épaisseur 45 mm en acier S460 qui sont vérifiés pour transmettre aussi bien par traction que par compression les efforts longitudinaux ;

→ Deux axes de diamètre 185 mm en acier 42 CrMo 4 ( $f_y = 500$  MPa,  $f_u = 750$  MPa) ;

→ Une boîte d'ancrage mécanosoudée en acier S460 ;

→ Un ensemble de 10 barres de diamètre 50 mm précontraintes qui assure le clouage de la boîte d'ancrage sur le génie civil de la culée.



© ALEXISTOUREAU  
9



11  
© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE CM



10  
© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE CM

Ce dispositif ne pouvant être activé avant la fin des travaux de la culée C6, il a été installé un appui fixe provisoire de façon à bloquer l'ouvrage longitudinalement pendant le bétonnage de la dalle et une partie des travaux d'équipement du tablier. Cet appui provisoire a été remplacé par l'appui définitif immédiatement après la mise en œuvre du blocage longitudinal.

**LES ÉQUIPEMENTS**

L'extrados du tablier est revêtu d'une chape d'étanchéité adhérente surmontée d'une couche de protection. Le tablier est équipé d'écrans latéraux en béton armé assurant une fonction de protection acoustique, de garde-corps et d'écrans pare-ballast. Une main courante métallique est fixée sur leur face intérieure.

Les pistes de service courent sur les couvercles des caniveaux à câbles et à eau. Les eaux pluviales recueillies sur le tablier sont rejetées directement sous l'ouvrage par des gargouilles, le TGV ne produisant pas de pollution. Les poteaux caténaires sont ancrés dans des massifs de 600 x 700 mm situés entre les voies et les caniveaux à câbles.

Le vide entre l'extrémité du tablier et le garde-grève de la culée C6 (culée côté point fixe) est ponté par un joint-couteau à tôles glissantes, franchi sans discontinuité par le ballast et par les voies. Le vide entre l'extrémité du tablier et le garde-grève côté C0 (culée côté opposé au point fixe) est ponté par un joint garde-ballast. ▷

- 9- Connecteurs soudés sur les semelles supérieures des poutres.
- 10- Poutres principales en fin de fabrication.
- 11- Installation de grenailage et de peinture.
- 12- Poutre principale après peinture.

- 9- Connectors welded to the girders' top flanges.
- 10- Main girders at end of manufacturing.
- 11- Shot blasting and painting facility.
- 12- Main girder after painting.



© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE CM  
12





13

© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE CM

Les parties métalliques de l'ouvrage (ferraillage du tablier et des appuis, ossature du tablier, mains courante, etc.) sont mises à la terre.

Les têtes de piles et les culées sont aménagées de manière à permettre l'inspection et la maintenance de l'ouvrage : escaliers d'accès aux culées, baignoires en têtes de piles.

#### CONCEPTION PARASISMIQUE

L'ouvrage a été conçu en application des règles de conception et de réalisation parasismique en vigueur (zone d'aléa sismique faible selon la nouvelle carte nationale d'aléa sismique). Les ponts-rail se caractérisent par une masse importante des tabliers et d'autre part par des appuis peu déformables sous l'effet de la circulation des trains (freinage et démarrage notamment), ce qui va à l'encontre de la souplesse et de la légèreté recherchée en conception parasismique.

Les appareils d'appuis unidirectionnels des piles et culées ont été dimensionnés pour la reprise des efforts sismiques transversaux.

Sur la culée C6 le concepteur a prévu la mise en œuvre de deux bielles arti-

culées qui transmettent les efforts à la culée. Ces bielles sont dimensionnées pour les efforts sismiques longitudinaux, mais aussi les efforts de freinage et de démarrage des trains.

#### COMPORTEMENT DYNAMIQUE

L'étude de comportement dynamique des ouvrages sous le passage des convois à grande vitesse revêt une

**13 & 14- Ouvrage en cours de lancement.**

**13 & 14- Structure undergoing launching.**

importance particulière. Elle vise à vérifier les critères garantissant la sécurité des convois, la stabilité des voies et le confort des usagers.

Les vérifications ont été menées avec la méthode d'analyse dynamique par superposition modale. À partir d'une modélisation spatiale du tablier par éléments finis, on a procédé à une analyse modale. Cette analyse a permis de sélectionner les modes significatifs pour le calcul de la réponse de l'ouvrage. Le niveau de confort exigé est le niveau « très bon ».

#### RÉALISATION DU TABLIER LES MATÉRIAUX MIS EN ŒUVRE

Les matériaux utilisés pour la réalisation de l'ouvrage proviennent des aciéries de Dilling en Allemagne (Sarre) et sont livrés à l'usine de Lauterbourg (67) par voie d'eau (figure 5).

Les plaques métalliques sont de la nuance S 355 K2+N, S 355 N et ML conformément à la norme EN 10025. Les épaisseurs des tôles mises en œuvre varient de 20 à 115 mm.

Environ 1 650 t d'acier ont été mises en œuvre pour la construction du viaduc de la Vienne.



14

© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE CM

## LA FABRICATION

L'ensemble des éléments métalliques du tablier a été fabriqué à l'usine d'Eiffage Construction Métallique de Lauterbourg en Alsace, puis livré sur site par convois exceptionnels. Les poutres principales du viaduc ont été découpées en 17 tronçons.

Le poids unitaire des tronçons de poutre est compris entre 30 et 57 t.

L'usine Eiffage CM de Lauterbourg est particulièrement bien équipée pour la fabrication de ce type de structure.

La fabrication nécessite la mise en œuvre de plusieurs opérations :

- Le débitage (découpe des pièces unitaires). L'usine dispose de bancs d'oxycoupage et de découpe au plasma (figure 6) ;
- La constitution des poutres PRS (poutres reconstituées soudées). Deux machines de grande capacité fabriquent ces poutres sans opération préalable d'assemblage ou de pointage (figures 7 et 8) ;
- Les opérations d'habillage qui consistent à assembler des éléments secondaires (raidisseurs, attaches etc.) sur les poutres ;
- Le goujonage qui consiste à positionner et à souder les connecteurs sur la semelle supérieure des poutres (figure 9).

## LA PROTECTION ANTI CORROSION

C'est le système certifié ACQPA n° C4 ANV 720 avec préparation de surface au degré de soin DS3 qui a été retenu pour la protection anti corrosion des charpentes métalliques de l'ouvrage avec la teinte de finition RAL 7035 (Gris lumière). L'application de la couche primaire et intermédiaire s'est faite en atelier avant expédition des pièces (figures 10, 11 et 12).

Après assemblage et soudage sur chantier et avant lancement, on a procédé à la reconstitution du système atelier au droit des soudures chantier et à l'application de la couche de fini-



15  
© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE CM

tion sur les faces vues et non vues. Après lancement et réalisation de la dalle bétonnage, on a réalisé l'application du système complet au droit des platines d'appui et les retouches des dégradations dues au lancement et aux travaux de génie civil.

## LA LIVRAISON DES PIÈCES AU CHANTIER

Les pièces sont chargées sur camions dans l'usine, puis partent pour un trajet de près de 800 km pour être livrées sur le site de montage. Tous ces éléments font l'objet de convois routiers exceptionnels. Le poids unitaire des pièces varie de 32 à 56 t, la longueur des pièces varie de 17 à 23 m.

## LE MONTAGE DE L'OUVRAGE

Les assemblages des poutres et diaphragmes sont réalisés par soudage, les contreventements inférieurs sont assemblés par boulons à haute résistance.

C'est la méthode de mise en place par lancement qui a été retenue. Vu la longueur du tablier cette opération s'est faite en trois phases successives d'assemblage et de lancement (figures 13 et 14). La charpente a été lancée avec sa peinture définitive et avec la passerelle en caillebotis montée.

C'est un système de treuils à câble qui a été utilisé pour réaliser les opérations de lancement (figure 15). Le déplace-

15- Dispositif de traction de l'ouvrage.

15- Structure traction system.

ment de l'ouvrage sur ses équipements de lancement s'est fait par glissement sur des appuis de lancement avec revêtement téflon. L'utilisation de ces types d'appuis de lancement réduit de manière significative les efforts à mobiliser pour déplacer l'ouvrage. Dans le cas du viaduc de la Vienne, l'effort maximum enregistré est de 30 t pour une masse totale déplacée proche de 1 800 t.

Après la dernière opération de lancement, la pose des appareils d'appui a commencé.

Les appareils d'appui définitifs ont été conçus et vérifiés pour être posés immédiatement après le lancement du tablier et avant le coulage de la dalle. Un appui fixe provisoire a été mis en place sur la culée C6 le temps de pouvoir installer le dispositif définitif de blocage longitudinal. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS DE L'OUVRAGE

**LONGUEUR : 344,5 m**  
**PILES : 5 dont 3 en rivière (hauteur maximum 15 m)**  
**SURFACE TABLIER : 4 444 m<sup>2</sup>**  
**OSSATURE MÉTALLIQUE : 1 635 t**  
**CONNECTEURS : 15 t**  
**PLATELAGE CAILLEBOTIS : 1 830 m<sup>2</sup>**  
**COÛT DE LA CHARPENTE MÉTALLIQUE : 4 430 K€ HT**  
**QUANTITÉS BÉTON : 7 300 m<sup>3</sup> de béton**

## LES INTERVENANTS

**CONCESSIONNAIRE : Lisea (Vinci Concessions Meridiam - Caisse des Dépôts Infrastructures - Ardian)**

**CONCEPTEUR CONSTRUCTEUR : Cosea (Vinci Contracting - Cofely Ineo - Systra)**

**ENTREPRISE PRINCIPALE : Cosea-SGI (Vinci Construction Terrassement - Dodin Campenon Bernard - Vinci Construction Grands Projets - Vinci Construction France - Nge - Razel-Bec - Eurovia Grands Projets et Industrie - Eurovia-Poitou-Charentes-Limousin)**

**TRAVAUX DE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE : Eiffage Construction Métallique, sous-traitant de Vinci Construction Terrassement**

## ABSTRACT

### TOURS-BORDEAUX SEA HSL - DECK OF THE VIENNE VIADUCT

JEAN-PIERRE GERNER, EIFFAGE

*The Vienne viaduct is representative of the five composite steel-concrete railway bridges on the SEA high-speed rail line. It is 345 metres long and consists of a double girder with lower wind bracing formed by a steel lattice. The fixed point of the structure is located on one of the abutments and is ensured by a system of articulated connecting rods which absorb seismic forces and train braking forces. The structure was placed in position by launching in three successive sections. □*

### LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD SUR EUROPA ATLÁNTICO TOURS BURDEOS - EL TABLERO DEL VIADUCTO DEL RÍO VIENNE

JEAN-PIERRE GERNER, EIFFAGE

*El viaducto del río Vienne es representativo de los 5 puentes ferroviarios de estructura mixta acero-hormigón de la línea de alta velocidad Sur Europa Atlántico. Con una longitud de 345 m, se trata de un viaducto de dos vigas con arriostramiento inferior formado por una celosía metálica. El punto fijo de la estructura está situado en uno de los estribos y está asegurado por un sistema de bielas articuladas que absorben los esfuerzos sísmicos y de frenado de los trenes. La estructura ha sido colocada por lanzamiento en tres tramos sucesivos. □*





1  
© PHOTOTHÈQUE LISEA

# SAUTS-DE-MOUTON DE LA LGV SEA

AUTEURS : ALEXANDROS GIANNOPOULOS, INGÉNIEUR OUVRAGE D'ART, EGIS JMI - NABIL YAZBECK, CHEF DE PROJET, EGIS JMI - MOHAMMED EL HAJJAMI, RESPONSABLE DU PÔLE OUVRAGES D'INFRASTRUCTURE ET OUVRAGES SOUTERRAINS, ISC (VINCI CONSTRUCTION FRANCE) - MARINE LE TALLEC, CHEF DE PROJETS, PÔLE OUVRAGES D'INFRASTRUCTURE ET OUVRAGES SOUTERRAINS, ISC (VINCI CONSTRUCTION FRANCE) - KEVIN MARTIN, CHEF DE PROJETS, PÔLE OUVRAGES D'INFRASTRUCTURE ET OUVRAGES SOUTERRAINS, ISC (VINCI CONSTRUCTION FRANCE)

**LE TRACÉ DE LA LIGNE LGV SEA INTERCEPTE PLUSIEURS FOIS LES LIGNES FERROVIAIRES EXISTANTES PARIS - BORDEAUX ET POITIERS - LA ROCHELLE. CECI A DONC IMPLIQUÉ LA CONSTRUCTION DE MULTIPLES SAUTS-DE-MOUTON AVEC DES PROBLÉMATIQUES SPÉCIFIQUES DE GÉOMÉTRIE, DE CONCEPTION ET DE MÉTHODES DE CONSTRUCTION. L'ARTICLE, COÉCRIT PAR LES CONCEPTEURS ET LES CONSTRUCTEURS, ILLUSTRE CES PROBLÉMATIQUES AU TRAVERS DE LA CONCEPTION DE L'ESTACADE D'AMBARÈS QUI EST LE RACCORDEMENT SUD DE LA LGV ET AU TRAVERS DE LA CONSTRUCTION DES SEPT SAUTS-DE-MOUTON SUR RÉSEAU FERRÉ NATIONAL.**

## L'EXEMPLE DE L'ESTACADE D'AMBARÈS

Les ouvrages regroupés sous le nom d'estacade d'Ambarès constituent le raccordement de la LGV SEA à la ligne Classique Paris-Bordeaux (figure 1). Ce raccordement est situé sur le territoire de la commune d'Ambarès-et-Lagrave, dans une zone déjà fortement urbanisée et doit s'insérer dans une emprise très exiguë, avec

des contraintes fortes au sud-est. C'est pourquoi, suivant une géométrie inhabituelle, les voies de la ligne nouvelle ne rejoignent pas la ligne classique par l'extérieur de sa plate-forme, mais d'un seul côté, ce qui impose de dévier l'une des voies existantes pour pouvoir loger l'aiguillage. L'ouvrage projeté permet à la voie V1 de la LGV (sens Paris-Bordeaux) de passer par-dessus la voie V2 de la

**1- Estacade d'Ambarès - Ouvrage fini.**

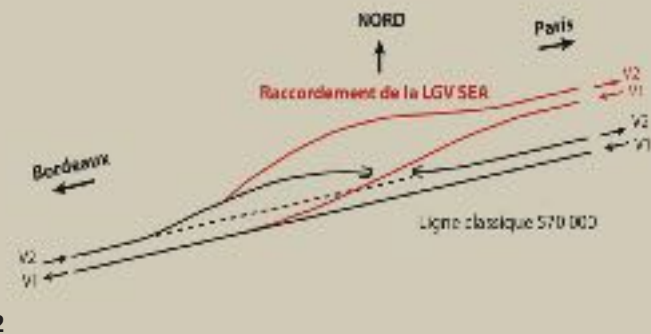
**1- Estacade d'Ambarès - Finished structure.**

ligne classique (sens Bordeaux-Paris) (figure 2), qui elle-même est déviée vers le nord-ouest.

Il regroupe trois structures successives, supportant la voie V1 de la ligne nouvelle :

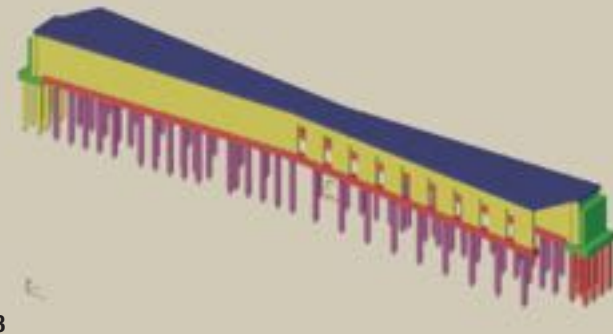
→ À l'est, côté Paris, une première estacade à 6 travées, longue de 135 m, permet à la voie de s'élever au-dessus du niveau de celle qu'elle va franchir ;

SCHÉMA EXPLICATIF DU RACCORDEMENT  
Estacade d'Ambarès



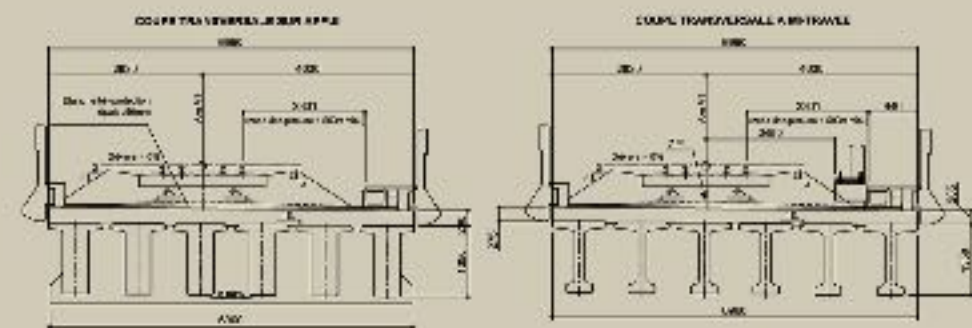
2

COUPE SCHEMATIQUE SUR LA VOIE 2  
Estacade d'Ambarès



3

COUPES TRANSVERSALES SUR ESTACADE  
Estacade d'Ambarès



4

FIGURES 2, 3 & 4 © EGIS - FIGURE 4 © CEDI

- Un saut de mouton de 114 m lui permet de franchir le nouveau tracé de la voie V2 de la ligne classique ;
- À l'ouest, côté Bordeaux, une seconde estacade à 9 travées, longue de 202,5 m, lui permet de rejoindre le niveau de la voie V1 de la ligne classique afin de pouvoir s'y raccorder.

En raison de la compressibilité du sol, le choix s'est porté sur ces estacades de grande longueur de préférence à de simples remblais. Si le saut de mouton avait été directement encadré par des remblais de grande hauteur, leur poids aurait été susceptible de provoquer des tassements nuisibles à la sécurité de la circulation sur les voies de la ligne classique.

**LES DEUX ESTACADES**

Les tabliers sont constitués de 6 poutres PRAD (précontraintes par adhérence) (figure 4). Les appuis des estacades sont fondés sur pieux forés de gros diamètre, pour supporter les efforts horizontaux de freinage et de séisme malgré la réaction relativement faible opposée par les alluvions de couverture. Ces pieux sont ancrés dans le substratum marneux sain.

**2- Estacade d'Ambarès - Schéma explicatif du raccordement.**

**3- Estacade d'Ambarès - Coupe schématique sur la voie 2.**

**4- Estacade d'Ambarès - Coupes transversales sur estacade.**

**2- Estacade d'Ambarès - Explanatory diagram of the connection.**

**3- Estacade d'Ambarès - Schematic cross section on track 2.**

**4- Estacade d'Ambarès - Cross sections on viaduct.**

Les ouvrages type PRAD ne bénéficient que d'un retour d'expérience limité sur les lignes LGV, des précautions particulières ont été prises pour leur conception et pour leur exécution. Deux sujets ont fait débat lors de la conception et l'exécution de cette estacade.

**La précontrainte additionnelle**

Afin de parer à une évolution imprévue du comportement mécanique du tablier (déformations excessives en zone d'appui en béton armé ou un défaut de précontrainte), des dispositions ont été prises pour permettre, pendant la vie de l'ouvrage, la mise en œuvre d'une précontrainte additionnelle.

La précontrainte additionnelle prévue est une précontrainte extérieure rectiligne, à raison d'un câble 4T15 entre deux poutres successives et ancrée dans les entretoises d'extrémités de tritravées. Cette précontrainte a pour but de pallier une insuffisance au niveau de la fibre supérieure des entretoises (zone en béton armé). Cette précontrainte correspond à 20% de la précontrainte initiale soit 2 câbles T15 par poutre. La quantité à assurer n'étant pas fixée dans le référentiel technique ni dans l'Eurocode, c'est un choix des concepteurs et le résultat d'une réflexion plutôt probabiliste que déterministe.

Des ancrages noyés ont été prévus dans les entretoises d'extrémité avec un ferrailage de frettage pour permettre l'ancrage des barres à haute limite d'élasticité et la diffusion des efforts dans l'entretoise. Ces barres pourront ensuite être vissées et les câbles de 4T15 seront tendus ; le transfert de charge entre les barres et les câbles se faisant par l'intermédiaire d'un chevette métallique.

**Schéma statique**

La longueur de dilatation des tabliers est limitée à 90 m afin d'éviter l'utilisation d'appareils de dilatation de voie. Pour cette raison, l'estacade est constituée de tronçons de 3 travées de 22,5 m. Une fois achevés, les tronçons de tablier ont, vis-à-vis des charges verticales, le schéma statique d'une poutre continue sur appuis simples. Pour chaque tronçon de tablier, les déplacements sont bloqués dans la direction longitudinale sur l'ensemble des appareils d'appuis situés sur la file d'appui située à l'extrémité de tritravée. Dans la direction transversale sur chaque file d'appuis, les déplacements transversaux sont bloqués sur un appareil d'appui.

Au stade des études d'exécution, ils ont été remplacés par des appareils d'appui à pot, fixés dans la structure par des goujons.

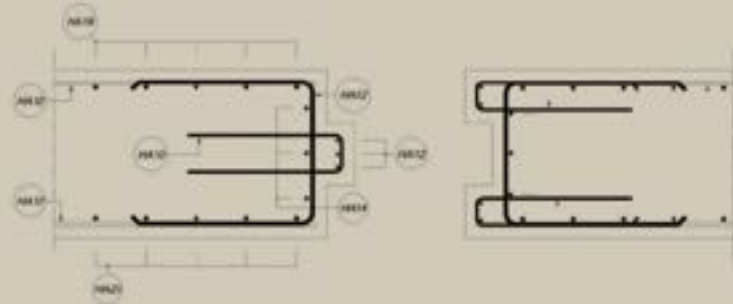
Des dispositions ont été prises afin d'éviter la rupture en chaîne sous application d'un effort horizontal important (freinage/démarrage et séisme). Pour éviter la rupture en chaîne, il faut assurer une mobilisation simultanée des points d'appui et pour cela, il faut que :

- L'élément le plus faible soit la connexion par goujons, de façon à ce qu'elle se plastifie en premier ;
- Les jeux entre des appareils d'appui à pot soit minimal.





SAUT-DE-MOUTON D'AMBARÈS - DÉTAIL DE JOINTS



Le palier plastique des goujons a été estimé, à partir de l'EC4, entre 1,3 et 6 mm de déplacement de ce goujon. Le jeu de fonctionnement entre le piston et le pot, qui dépend des tolérances d'usinage, a été ramené à 0,40 mm au lieu de 0,85 mm, de manière à être significativement inférieur à 1,3 mm. Le BET d'exécution a fait un calcul non-linéaire en considérant tous les scénarios possibles sur la répartition de ce jeu sur les 4 appareils et en calculant l'effort supplémentaire repris par le premier appui se mettant en contact.

**LE SAUT DE MOUTON**

Le saut de mouton est un portique en béton armé dont les piédroits sont espacés de 6,40 m, avec un biais de la traverse à 63°. Deux cellules de plan triangulaire sont accolées au portique ; elles font office de culées creuses pour les extrémités C6 et C7 des estacades d'accès. Celles-ci reposent sur un mur

de front de 2,1 m d'épaisseur disposé perpendiculairement à l'axe de la voie portée. Les culées creuses forment avec le portique un ensemble monolithique, fondé sur pieux. La modélisation au stade de l'APD a été réalisée à l'aide du logiciel SCIA Engineer®. La structure est modélisée par des coques pour les dalles et les piédroits, des barres filaires pour les longrines et les pieux (figure 3). La traverse supérieure est d'épaisseur constante égale à 67 cm. Elle est plane, orientée suivant deux plans qui se coupent au droit de l'intersection des voies. L'épaisseur courante des piédroits et des voiles latéraux des culées creuses est de 70 cm pour une hauteur variable de 8 à 8,5 m environ. Chacun d'eux repose par l'intermédiaire d'une longrine de répartition sur une file de pieux Ø 1 000 mm, dont l'espacement courant est de 3 m. Les murs de front des culées reposent sur 8 pieux chacun.

**Schéma statique - Joints de dilatation**

Dans le sens longitudinal, le portique est découpé en six tronçons d'environ 18 m de longueur par des joints secs rendus étanches par des bandes de caoutchouc. Dans la traverse et les piédroits, ces joints comportent un embrèvement pour bloquer les déplacements relatifs dans la direction perpendiculaire aux parements, afin d'éviter le piano-tage (figure 5).

**5- Saut-de-mouton d'Ambarès - Détail de joints.**

**6- Positions des sauts-de-mouton sur le tracé de la ligne SEA.**

**7- Saut-de-mouton 1815.**

**5- Estacade d'Ambarès - Detail of joints.**

**6- Locations of flyovers on the route of the SEA line.**

**7- Flyover 1815.**

**L'EXEMPLE DES SAUTS-DE-MOUTON SUR RÉSEAU FERRÉ NATIONAL (RFN)**

**PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES OUVRAGES**

Les sept ouvrages de type Saut-de-mouton (SDM), franchissement d'une voie ferroviaire par un pont-rail, sur RFN (réseau ferré national), sont répartis sur cinq sections le long du tracé de la ligne SEA (figure 6).



## PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES SDM SUR RFN

Nom	Longueur du portique	Fondation de l'ouvrage	Longueurs des murs en retour	Vitesse de référence
SDM 1815	52,2m	semelle	79m et 32m	350 km/h
SDM 0382	35,7m	radier	28,8m et 38,4m	350 km/h
SDM 1/31	110,4m	pieux	59m et 60,5m	350 km/h
SDM 1059	45,88m	pieux	30m et 30m	350 km/h
SDM FS20012	84,78m	pieux	48m et 95m	170 km/h
SDM MS20015	104m	pieux	89m et 73m	230 km/h
SDM CE1009	93m	pieux	52m et 41m	160 km/h

8

Les lignes ferroviaires ont été maintenues en exploitation tout au long de la durée des travaux, ce qui a imposé des contraintes fortes liées aux travaux à proximité des voies ferroviaires qui ont été intégrées dès la phase de conception. La conception retenue pour ces ouvrages est un portique, de 15,60 m d'ouverture droite, dont la traverse est constituée de poutres PRAD (pré-contrainte par adhérence) encastées sur les piédroits et surmontées par un hourdis coulé en place (figure 7). Ce choix limite les travaux au-dessus des voies ferrées et tient compte du nombre et du calendrier très contraignants des ITC (Interruption Temporaire de Circulation), 2 à 3 interruptions doubles voies sont accordées par ouvrage. Les portiques sont prolongés par des murs de soutènement pour soutenir les remblais contigus aux ouvrages.

Ces ouvrages ont été conçus les plus similaires possible afin d'industrialiser au maximum les travaux et d'avoir la même approche de gestion aux contraintes ferroviaires.

Les sept SDM présentent les mêmes caractéristiques d'ouverture, de type de couverture, de conception des piédroits et des murs en retour.

Malgré ces ressemblances, ces ouvrages ont des caractéristiques qui diffèrent (figure 8) : longueur variable selon le biais entre la voie LGV et la voie ferrée existante franchie, type de fondation selon la nature des terrains, vitesse de référence.

Le SDM 0382 dispose en outre de deux cadres latéraux qui permettent de franchir deux voies communales (figure 9).

### CONTRAINTES SPÉCIFIQUES AUX TRAVAUX À PROXIMITÉ DES VOIES FERROVIAIRES MAINTENUES EN EXPLOITATION

Le maintien de la circulation sur les lignes d'exploitation et les interruptions

#### 8- Principales caractéristiques des SDM sur RFN.

#### 9- Saut-de-mouton 0382.

#### 8- Main characteristics of flyovers on the national railway network.

#### 9- Flyover 0382.

temporaires de circulation (ITC) planifiées de longue date avec la SNCF ont dicté toute l'organisation et le phasage des travaux.

Elles ont notamment conduit à engager très rapidement la réflexion sur les méthodes, car elles devaient être discutées et validées par plusieurs interlocuteurs côté SNCF mais aussi plusieurs équipes de travaux compte tenu de la répartition de ces ouvrages sur plusieurs sections de travaux. La scénarisation complète en 3D de toutes les phases de travaux, très appréciée côté SNCF, a permis de faciliter et d'accélérer les échanges pour aboutir à des dispositions et des phasages garantissant la sécurité pen-

dant les travaux et respectant les prescriptions du l'IN0033 avec le minimum de contraintes pour le chantier.

Les études d'exécution de structures et des méthodes ont été confiées à une filiale du constructeur pour mener les études de méthodes et de structures en parallèle.

#### Zone de protection / zone interdite

L'IN0033 de la SNCF définit des zones de travail à proximité des voies ferrées (figure 10) :

→ Zone interdite (interdiction d'intercepter) : 3 m depuis l'axe de chaque voie en circulation ;

→ Zone de protection (interdiction de levage ou de manutention) : 5 m depuis l'axe de chaque voie en circulation.

La zone de travail restant pour construire les piédroits est très réduite et ne permet donc pas le positionnement des matériels de coffrage.

Pour réduire la zone de protection, des écrans de protection ont été réalisés entre 3,50 m et 4 m de l'axe de la voie la plus proche (figure 11). Ces écrans ont été disposés de part et d'autre des voies de circulation des trains pour protéger les voies existantes, pour empêcher les ouvriers, les engins et le matériel d'intercepter les voies,

ainsi que pour protéger les caténaires existantes.

#### Plans P0, P1, P2 contraignant les terrassements des fondations (figure 10)

En effet, conformément à l'IN, toute fouille franchissant le plan P1 doit être obligatoirement blindée, à cause du risque de déstabiliser la plateforme ferroviaire. Le blindage a été nécessaire pour la réalisation des longrines du saut-de-mouton FS20012.

Pour les autres, le plan P1 passe très près de l'arase inférieure des semelles et des longrines des ouvrages, ce qui a nécessité une vigilance accrue pendant les phases de terrassement.

#### Pose des poutres et des prédalles sous ITC (Interruption Temporaire de Circulation)

La pose des poutres et des prédalles s'effectue de nuit sous ITC durant 2 ou 3 week-ends, soit 4 à 6 nuits, selon les ouvrages. Toutes les méthodes ont donc été mises au point afin de faciliter et optimiser les travaux lors de cette phase sous tous les aspects, notamment les modes de stockage, élingage/désélingage, la réalisation de l'étanchéité et les coffrages des abouts de poutres.

#### Dispositif d'alerte

Ce dispositif consiste en une liaison directe avec la SNCF depuis le chantier pour signaler immédiatement tout incident ayant un impact sur les voies et pouvant potentiellement mettre en danger les trains en circulation ainsi que leurs passagers. Outre l'équipement nécessaire à son fonctionnement, son activation nécessite une présence permanente d'un agent de la SNCF. Compte tenu de son coût, une analyse de risque de chacune des phases de travaux a été menée, pour identifier celles où l'activation du dispositif d'alerte était nécessaire. Ses conclusions ont été soumises à la SNCF pour validation.

### DESCRIPTION DES OUVRAGES

#### Fondation

Les types de fondation varient d'un ouvrage à l'autre en fonction de la nature des terrains rencontrés sur chaque site :

→ **SDM 0382** : radiers de 8,4 m de large ;

→ **SDM 1815** : semelles de 5 m de large ;

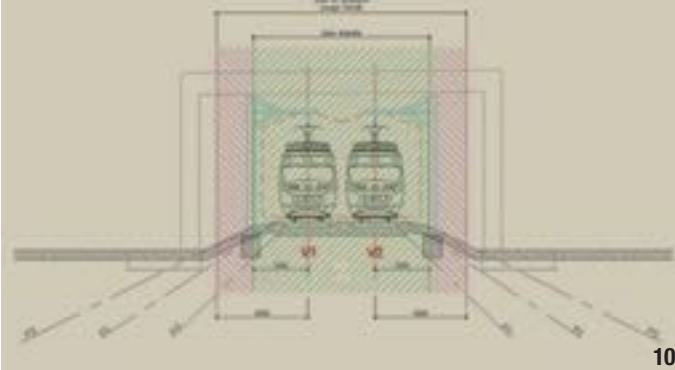
→ **SDM 1059, SDM MS20015, SDM FS20012, SDM CE1009** : une seule file de pieux de 1,2 m de diamètre espacés tous les 3,6 m sous chaque piédroit ;



9



**ZONE DE PROTECTION / ZONE INTERDITE  
selon l'IN0033**



10



11

→ **SDM 1731** : deux files de pieux de 1,2 m de diamètre espacés tous les 3,6 m sous chaque piédroit.

**Piédroit**

Les piédroits ont une épaisseur de 1 m lorsque l'ouvrage est fondé sur des semelles et 1,2 m lorsqu'il est fondé sur pieux.

Afin de minimiser les effets du retrait gêné du béton, les piédroits sont réalisés par plots d'environ 10 m de long. Les joints entre plots sont alternativement de type joint sec et joint à embrèvement avec bande d'arrêt d'eau.

**Traverse**

La traverse des portiques des SDM, de 1,15 m de hauteur, est constituée de la manière suivante (figure 12) :

→ **Poutres PRAD à talons jointifs** :

Les poutres PRAD ont 0,85 m de haut et 1,18 m de large. Chaque poutre comporte 13 torons T15S. Un jeu de 2 cm a été prévu entre chaque poutre pour compenser les différentes tolérances (de réalisation et de pose), ce qui fait que l'entraxe des poutres PRAD est de 1,2 m. Les poutres ont une longueur de 15,8 m qui permet d'assurer une largeur d'appui de 0,10 m sur les piédroits. Le ferrailage des têtes de piédroit a été adapté pour permettre la pose des poutres directement en tête des piédroits et sans corbeaux. La forme des poutres en T inversé et à talons jointifs permet d'assurer un deuxième niveau d'étanchéité, après celui des prédalles lors du bétonnage du hourdis. Cette disposition a aussi permis de bétonner le hourdis de certains ouvrages sans interruption de la circulation.

→ **Prédalles de coffrage** : Les prédalles, d'épaisseur 5 cm, sont non participantes, elles servent uniquement comme coffrage pour le bétonnage du hourdis. Elles portent

**POUTRES PRAD**



12a



12b

FIGURES 10 & 11 © ISC - FIGURE 12 © SGI

entre deux poutres PRAD et font 2 m de long.

→ **Hourdis** : Le hourdis d'épaisseur 30 cm est coulé en place sur les prédalles. Il permet également d'assurer le clavage des poutres avec les piédroits.

**Murs de soutènement**

Les murs de soutènement soutiennent le remblai contigu aux ouvrages dont la hauteur est d'environ 11 m au point haut. Ils ont été réalisés en béton armé coulé en place. L'épaisseur en tête des murs est constante de 0,30 m et l'épaisseur en pied varie linéairement selon un fruit longitudinal pour tenir compte de la variation de la hauteur de terre soutenue. La face côté remblai

**10- Zone de protection / zone interdite selon l'IN0033.**

**11- Réalisation des piédroits.**

**12- Poutres PRAD.**

**13- Pose des poutres.**

**10- Protection zone / prohibited zone as per IN0033.**

**11- Execution of columns.**

**12- Bonded post-tensioned beams.**

**13- Placing beams.**

a donc un double fruit : transversal et longitudinal.

Pour certains murs (SDM FS20012, SDM MS20015 et SDM CE1009), une variante en terre armée, plus économique, a été retenue.

**DÉROULEMENT DES TRAVAUX**

**Les pieux**

Tous les pieux sont forés et tubés sauf ceux du SDM CE1009 qui ont été réalisés à la tarière creuse selon le procédé Starsol.

Les pieux ont été exécutés sans activation du dispositif d'alerte, à l'abri des écrans de protection qui ont été réalisés préalablement.

**Semelles et longrines**

Le ferrailage des longrines et des semelles a été préfabriqué sur les aires de préfabrication. Des tirettes ont été mises en place entre les différents plots des longrines. Des coffrages manportables ont été utilisés pour permettre le bétonnage des longrines et des talonnettes par plots d'environ 20 m à l'aide de camions-pompe.

**Piédroits**

Les piédroits ont été réalisés selon le phasage suivant :

→ Mise en place du coffrage du piédroit côté chantier : levage et positionnement par colonnes de



13  
© ISC

- 3 banches contre la talonnette et puis stabilisation des banches avec lests et tire-pousse côté chantier ;
- Mise en place des cages d'armatures du piédroit : préfabrication de la moitié de la cage d'armatures du plot, mise en place d'un échafaudage pour le ferrailage entre l'écran de protection et le piédroit, puis levage de la cage à la grue mobile. Cette cage est glissée parallèlement aux voies ;
- Fermeture du coffrage du piédroit (figure 11) : levage et mise en place des trains de banches en les glissant parallèlement aux voies, puis fixation du train de banches côté chantier par serrage des tiges filetées ;
- Bétonnage du piédroit : bétonnage du piédroit au camion pompe par plots de 10 m environ.

#### Pose des poutres et des prédalles

Le phasage de pose des poutres et des prédalles ainsi que le matériel utilisé sont précisés. La pose est effectuée de nuit sous coupure de la circulation des deux voies ferrées (figure 13).

#### Hourdis

D'abord, le coffrage du hourdis côté chantier a été réalisé grâce à des coffrages manportables sur les consoles fixées aux piédroits. Ensuite, le ferrailage du hourdis a été effectué en place. Enfin, le hourdis a été bétonné par plots de 20 m grâce à des camions-pompes.

#### Stabilisation des poutres de rive en phase provisoire

L'équilibre des poutres de rive en phase provisoire (avant bétonnage) n'étant pas assuré compte tenu de leur profil et de l'importante prise au vent de leurs garde-corps, un système de stabilisation innovant a été mis au point (figure 14).

**14- Système de stabilisation de la poutre de rive.**

**14- Edge beam stabilising system.**



© ISC  
14

Il repose sur l'utilisation de rails métalliques permettant de solidariser la poutre de rive et les trois poutres PRAD adjacentes par des profilés UPN. Pour simplifier la mise en œuvre au-dessus des voies ferrées, des systèmes de fixation sont intégrés aux poutres

et des réservations sont prévues au niveau des ferrillages en attente des poutres.

Apprécié par les différentes équipes de chantier, le système a été adapté pour la réalisation de ponts routiers de la ligne. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

SAUTS-DE-MOUTON

**DÉLAI DE RÉALISATION DES TRAVAUX : 24 mois**

**POUTRES PRAD : 493 u**

**PIEUX : 435 pieux Ø 1,2 m**

**VOLUME TOTAL DE BÉTON : 23 400 m<sup>3</sup>**

**POIDS TOTAL D'ARMATURES : 3 400 t**

**RATIO D'ARMATURES MOYEN : 145 kg/m<sup>3</sup>**

## INTERVENANTS

**CONCÉDANT : RFF (Réseau Ferré de France)**

**CONCESSIONNAIRE : Lisea**

**EXPLOITATION ET MAINTENANCE : Mesea**

**ARCHITECTE : Lavigne & Cheron Architectes**

ESTACADE D'AMBARÈS

**CONCEPTEUR : Egis pour Cosea**

**ENTREPRISE : Vinci pour le groupement constructeur SGI**

**ÉTUDES D'EXÉCUTION STRUCTURES ET MÉTHODES : Campenon Bernard Dodin Ingénierie (CBDI)**

**CONTRÔLE EXTERNE : Secoa**

**CONTRÔLE EXTÉRIEUR : Cosea-DPR**

SAUTS-DE-MOUTON SUR RFN

**CONCEPTEURS : Egis, Inexia et Arcadis pour Cosea**

**ENTREPRISES : Vinci Construction Terrassements, Vinci Construction France, Razel-Bec, Nge et Demathieu & Bard**

**ÉTUDES D'EXÉCUTION STRUCTURES ET MÉTHODES : Isc (Vinci Construction France)**

**CONTRÔLE EXTERNE : Cogeci**

**CONTRÔLE EXTÉRIEUR : Cosea-DPR**

## ABSTRACT

### FLYOVERS ON THE SEA HSL

A. GIANOPOULOS, EGIS JMI - N. YAZBECK, EGIS JMI - M. EL HAJJAMI, ISC (VINCI) - M. LE TALLEC, ISC (VINCI) - K. MARTIN, ISC (VINCI CONSTRUCTION FRANCE)

The route of the SEA high-speed rail line has numerous interactions with existing railway lines, Paris-Bordeaux and Poitiers-La Rochelle. A system of two viaducts and a large flyover, called the Estacade d'Ambarès, had to be built to connect it with the conventional line in a highly constrained land area on entering the Bordeaux urban area. This geometrically very complex structure required special research for the structural design of prestressing and the static diagram. Further upstream, the line crosses the national railway network seven times. The flyovers for these crossings are portal structures with a cross member consisting of bonded post-tensioned beams. The design and construction methods for these structures were dictated by the vicinity of tracks in operation and by the very restrictive schedule for temporary traffic stoppages authorised by the SNCF (French Rail). □

### SALTOS DE CARNERO DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD SUR EUROPA ATLÁNTICO (LGV SEA)

A. GIANOPOULOS, EGIS JMI - N. YAZBECK, EGIS JMI - M. EL HAJJAMI, ISC (VINCI) - M. LE TALLEC, ISC (VINCI) - K. MARTIN, ISC (VINCI CONSTRUCTION FRANCE)

El trazado de la línea de alta velocidad Sur Europa Atlántico presenta múltiples interacciones con las líneas ferroviarias existentes París-Burdeos y Poitiers-La Rochelle. Su conexión en la entrada de la aglomeración urbana de Burdeos con la línea convencional, en una zona de terrenos sometidos a muchas exigencias, requirió la construcción de un conjunto de dos estacadas y de un gran salto de camero, denominado la Estacade d'Ambarès. Para la realización de esta estructura de gran complejidad geométrica fue preciso reflexionar especialmente en cuanto al dimensionamiento del pretensado y el esquema estático. Antes de este punto, la línea cruza siete veces la red ferroviaria nacional. Los saltos de camero que permiten este paso son estructuras en pórtico con una traviesa formada por vigas prefabricadas pretensadas por adherencia. La cercanía de las vías en explotación y el calendario muy apretado de las Interrupciones Temporales de Circulación autorizadas por la SNCF (Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses) han dictado el diseño y los métodos de ejecución de estas obras. □



# TRANCHÉE DE VEIGNÉ OUVRAGE D'ART EXCEPTIONNEL DE LA LGV SEA

AUTEURS : GUILLAUME CAMPION, RESPONSABLE DE PÔLE OUVRAGE D'ART, SYSTRA - JÉRÔME OLIVE, INGÉNIEUR D'ÉTUDES OUVRAGE D'ART, SYSTRA - EMMANUEL PRINGALLE, DIRECTEUR ADJOINT TRAVAUX, VINCI CONSTRUCTION

LA TRANCHÉE DE VEIGNÉ, DE 1 750 M DE LONGUEUR, EST L'OUVRAGE D'ART LE PLUS LONG DE LA FUTURE LIGNE À GRANDE VITESSE SUD EUROPE ATLANTIQUE (LGV SEA) TOURS-BORDEAUX. L'OUVRAGE, CONSTITUÉ DE PAROIS MOULÉES BUTONNÉES EN TÊTE D'UN RADIER EN BÉTON ARMÉ ET LOCALEMENT DE TRAVERSES EN TÊTE, EST RÉALISÉ SUR UN SITE PRÉSENTANT UN CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE COMPLEXE QUI A NÉCESSITÉ DES DISPOSITIONS PARTICULIÈRES LORS DE SA CONCEPTION ET LA MISE EN PLACE D'UNE INSTRUMENTATION SPÉCIFIQUE. LORS DES TRAVAUX, UN PHASAGE PRÉCIS A ÉTÉ RÉALISÉ AFIN D'OPTIMISER LES DÉLAIS DE RÉALISATION.



1 © PASCAL LE DOARF

## PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

La tranchée de Veigné (PRO 0040) est située sur le lot 1 de la ligne à grande vitesse SEA Tours- Bordeaux, entre les PK003+546 et 005+296. Cette tranchée, en partie ouverte et en partie couverte, se situe dans le département de l'Indre-et-Loire (37) sur la commune de Veigné, au sud de Tours (figures 1

et 2). Cet ouvrage permet le passage en déblai des deux voies de la LGV SEA, dans un secteur où la vitesse de référence est de 270 km/h. Le passage en tranchée plutôt qu'en déblai répond à l'engagement de l'État de raidir les talus pour minimiser les emprises. L'ouvrage passe successivement sous trois voies routières que sont la VC11, l'A85, la RD910 puis sous une voie

**1- Vue aérienne  
de la tranchée  
de Veigné.**

**1- Aerial view  
of the Veigné  
cut-and-cover.**

ferroviaire qui est la ligne à voie unique de Joué-lès-Tours à Châteauroux passant par Montbazou (figure 3).

La longueur de la tranchée est de 1 750 m, décomposée du PK003+546 au PK005+296 en 1 477 m de section de soutènement et 273 m de tranchée. L'ouvrage, dans ses cinq zones ouvertes (zones à fonctionnalité de soutènement uniquement), est formé de

2- Plan de situation de la tranchée de Veigné.

3- Vue en plan de la tranchée de Veigné.

4- Profil en long géologique de la tranchée de Veigné.

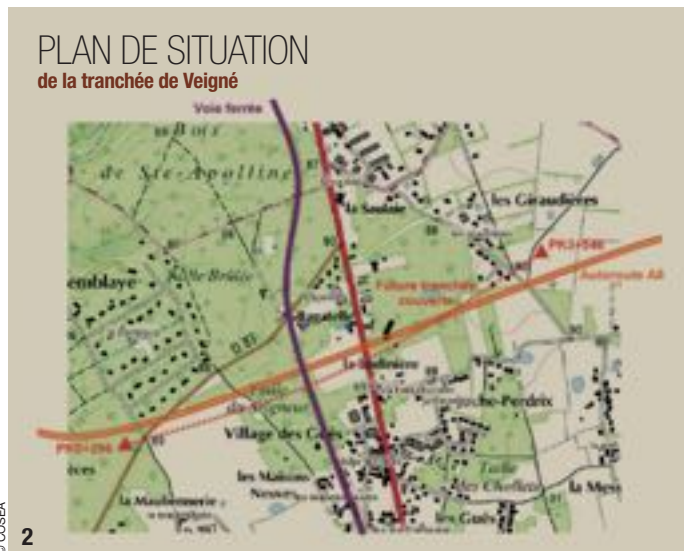
5- Niveaux de la nappe de l'Éocène et de la nappe du Sénonien.

2- Location drawing of the Veigné cut-and-cover.

3- Plan view of the Veigné cut-and-cover.

4- Longitudinal geological profile of the Veigné cut-and-cover.

5- Eocene aquifer and Senonian aquifer levels.



© COSEA 2



© COSEA 3

deux parois moulées maintenues en pied par un radier en béton armé et, en tête, par des butons en béton préfabriqués.

Sous les quatre voies rétablies, la structure de l'ouvrage est composée de deux parois moulées maintenues en pied par un radier et en tête par une traverse permettant de rétablir la voirie portée.

**CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE**

En partie supérieure, les terrains rencontrés sont constitués des Calcaires lacustres de Touraine datant de l'Éocène, calcaire blanc ou brun clair, souvent très pur ou argileux, en bancs compacts séparés par des marnes et argiles blanches ou verdâtres.

Ces calcaires sont surmontés de terrains de couverture de nature argileuse ou argilo-sableuses de faible épaisseur. Sous la couche de calcaire, on trouve les Argiles à Conglomérats datant de l'Éocène continental, argiles blanches, ocres parfois verdâtres, sableuses à graviers ou blocs de conglomérats siliceux.

En partie inférieure, on rencontre les formations du Sénonien, avec la couche d'Argiles à Silex en tête, argiles blanches ou verdâtres riches en silex gris ou blond très siliceux, suivie de la Craie blanche à Silex, craie blanche tendre contenant des silex gris ou blonds à cortex blanc (figure 4).

Au sein de la couche des Calcaires lacustres, on distingue plusieurs faciès différents : un faciès marneux plus ou moins carbonaté, un faciès calcaire et un faciès argileux. Ce dernier est constitué d'argiles vertes silteuses et plus ou moins marnieuses, très peu perméables et potentiellement gonflantes en présence d'eau.

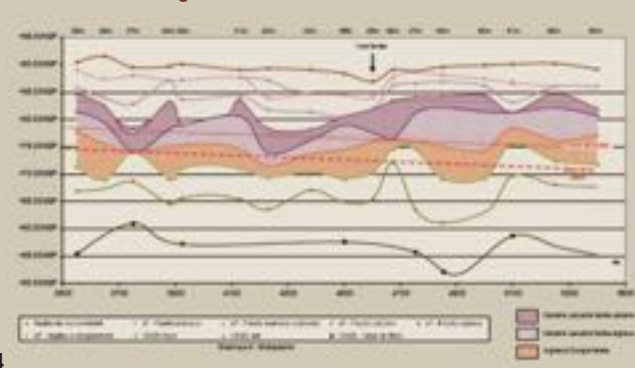
Concernant le contexte hydrogéologique, le site est caractérisé par la présence de deux nappes aquifères. On trouve à faible profondeur la nappe de l'Éocène, nappe perchée dans les Calcaires Lacustres de Touraine dont le niveau varie peu sur le linéaire de la tranchée, entre +80 NGF pour la cote la plus basse et +86 NGF pour la cote la plus haute. En raison de la présence de cette nappe, la poussée de l'eau sur l'ouvrage est à considérer pour le dimensionnement des parois moulées. La seconde nappe rencontrée est la nappe de la Craie du Sénonien dont les niveaux fluctuent entre +83 NGF au début de la tranchée à +62 NGF en fin de tranchée.

Ainsi, la nappe du Sénonien est drainée par la vallée de l'Indre et sa charge diminue significativement mais de manière régulière entre les PK003+500 et 005+300, soit entre le début et la fin de la tranchée (figure 5).

**CONCEPTION DE L'OUVRAGE**

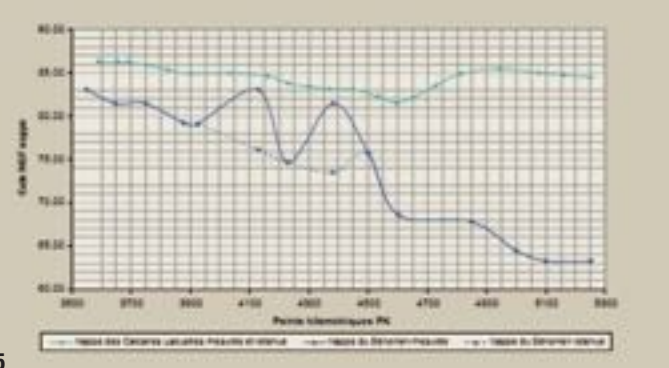
La structure en béton armé constituant l'ouvrage à construire se décompose en trois éléments structuraux qui sont les suivants (figure 6) :

**PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE de la tranchée de Veigné**



© COSEA 4

**NIVEAUX DES NAPPES de l'Éocène et du Sénonien**



5



- Deux parois moulées latérales servant au soutènement des terres et à la poussée hydrostatique due à la nappe de l'Éocène ;
- Un lit de butons préfabriqués disposés en tête des parois ;
- Un radier servant de butonnage bas permanent entre les deux parois.

Les parois moulées ont une épaisseur de 0,62 m dans les zones butonnées et au droit des rétablissements routiers de la RD910 et de la VC11. L'épaisseur est de 0,82 m au droit du pont-rail (PRa0046) pour le franchissement de la voie ferrée Joué-lès-Tours-Châteauroux et au droit de la traverse pour le franchissement de l'A85.

Au droit des ouvrages de franchissement de l'A85, de la RD910 et de la VC11, les parois moulées présentent, sur les 3 premiers mètres, des épaisseurs de 1 m (A85) ou 0,82 m (RD910 et VC11) afin de renforcer les têtes de parois qui sont les zones les plus sollicitées (figure 7).

La distance entre les nus des parois le long de la tranchée est de 11,90 m sur tout le linéaire de la tranchée sauf pour les parois supportant l'ouvrage de l'A85 (distance entre parois de 14,30 m afin de satisfaire la condition de section aérodynamique nécessaire) et dans les zones de niches caténaïres.

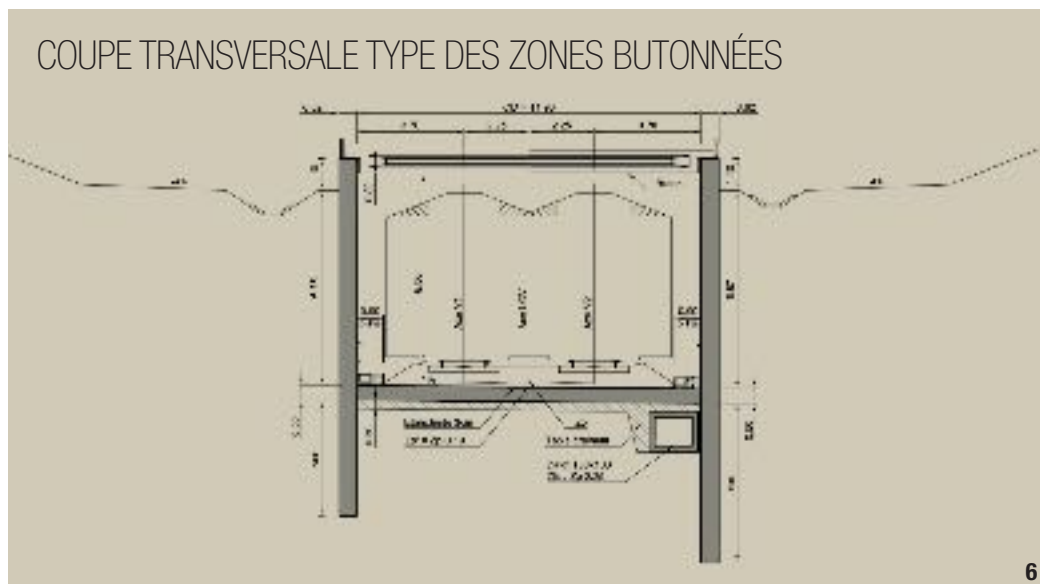
Les ouvrages de franchissement sont constitués de dalles en béton armé coulées en place d'épaisseur variant entre 1 m (VC11 et PRa0046) et 1,40 m (A85) et encastrées aux parois moulées ; ces dernières servant de fondations pour les dalles.

Les parois moulées sont réalisées par panneaux de 10 m de longueur environ comportant chacun deux cages d'armatures de 5 m de longueur.

Les butons préfabriqués permettent de bloquer le déplacement des parois moulées en tête, la profondeur des fiches des parois étant limitée. Ils sont disposés tous les 5 m environ et ont pour dimensions 0,60 m de largeur par 0,80 m de hauteur. Ils possèdent une section en forme de I pour alléger leur poids afin de faciliter leur transport.

Le niveau des butons est calé à +6,50 m au-dessus du rail le plus haut afin de garantir la hauteur libre suffisante pour le passage de la caténaire et des feeders. Les butons sont posés sur les parois moulées et liaisonnés aux têtes des parois au moyen de tiges d'ancrage en acier HA20.

Le radier supporte les voies ferrées de la LGV. Son épaisseur constante est de 0,50 m. Il est penté transversalement à 1 % vers un caniveau posé le long de



6

© COSEA

la paroi et longitudinalement à 0,25 % vers le PK005+300.

Le radier est coulé en place et n'a pas de connexion par armatures avec les parois moulées, un simple contact béton/béton permet d'éviter son glissement par frottement.

Les terrains situés directement sous le radier sont principalement soit les argiles vertes du Calcaire Lacustre de Touraine sur environ 660 m en début de tranchée, soit les Argiles à Conglomérats sur environ 620 m en fin de tranchée (figure 8).

La condition de non-glissement du radier est assurée par la réalisation d'un rainurage des parois moulées par deux rainures de 5 mm de profondeur minimum et 10 cm de hauteur.

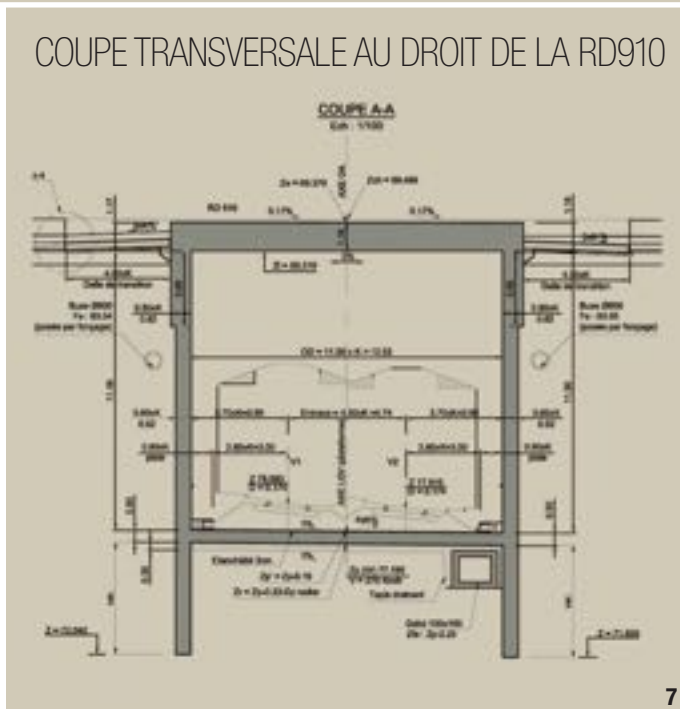
Il a été vérifié que cette condition permet de s'assurer que les efforts tranchants dus au gonflement potentiel des argiles vertes sont inférieurs aux efforts résistants par frottement au contact béton/béton entre parois moulées et radier.

Le radier est posé sur une couche de matériaux drainants de 0,30 m d'épaisseur mise en place pour drainer les eaux souterraines vers le dalot situé sous la piste.

Un géotextile anti-contaminant est posé en fond de fouille avant la couche drainante afin d'éviter le colmatage de cette couche par des fines.

Le dalot est équipé de barbacanes afin de récupérer les eaux drainées par la couche drainante.

Le drainage des eaux pluviales sur la plateforme ferroviaire est assuré par la pente transversale à 1 % de l'extrados du radier (de V1 vers V2) pour permettre une récolte dans le caniveau



7

© COSEA

**6- Coupe transversale type des zones butonnées.**

**7- Coupe transversale au droit de la RD910.**

**6- Typical cross section of stayed areas.**

**7- Cross section at the level of RD910 road.**

à eau côté V2 jusqu'au PK004+814. Au-delà, la pente transversale de l'extrados du radier est inversée (1 % de V2 vers V1) pour permettre une récolte dans le caniveau côté V1.

Une zone de pentage progressif de 1 % à 0 % puis de 0 % à -1 % de l'extrados du radier est réalisée dans le tiers central de la zone en alignement droit. Des descentes d'eau, situées tous les 10 m environ, permettent d'évacuer les eaux dans le dalot.

Des regards sont disposés tous les 80 m environ afin de permettre l'entretien du dalot.

Deux traversées sous voies sont présentes : l'une en amont de la tranchée (PK003+547) pour amener les eaux du fossé côté V1 vers le dalot côté V2, l'autre située au centre de la zone en alignement droit de la tranchée (PK004+814.63) pour faire transiter les eaux côté voie V2 vers le côté voie V1.

Compte-tenu des niveaux de la nappe de la Craie du Sénonien et des possibles fluctuations de cette nappe, il a été déterminé un risque de soulèvement du radier vis-à-vis des sous-pressions hydrostatiques s'appliquant à l'interface de la couche des Argiles à Conglomérats et de la couche d'argiles vertes dans les zones où le niveau de la nappe est supérieur au niveau du radier, soit entre le PK003+546 et le PK004+126 (580 ml).

Un dispositif de drainage par drains verticaux est mis en place afin de diminuer les sous-pressions dues à la mise en charge de la nappe de la Craie et assurer la stabilité du radier (figure 9).

Le dispositif est constitué d'une seule file de drains verticaux située en piste côté opposé au dalot pour assurer la maintenance du système de drainage (figure 9). Il est défini selon la répartition suivante :

- Entre les PK3+546 et 3+636 (90 ml) : drains de 19 m de profondeur espacés tous les 5 m ;
- Entre les PK3+636 et 4+126 (490 ml) : drains de 11 m de profondeur espacés tous les 10 m.

Les drains ont un diamètre de 200 mm. Ils sont remplis de graviers et équipés d'un tube central de 52/60 mm permettant le nettoyage par haute pression. L'évacuation des eaux drainées se fait au-dessus du radier.

Ces drains doivent être suivis pour s'assurer qu'ils ne se colmatent pas dans le temps. Par mesure conservatoire, des réservations sont également réalisées dans le radier entre chaque drain afin de pouvoir éventuellement forer de nouveaux drains.

#### 8- Couches d'argiles sous-jacentes au radier.

#### 9- Drainage vertical/évacuation des eaux.

#### 8- Underlying clay layers below the invert.

#### 9- Vertical drainage/discharge of water.

## ÉQUIPEMENTS MIS EN PLACE

### ÉQUIPEMENTS POUR LA MAINTENANCE

La tranchée possède des équipements pour les visites d'inspection relatives à la maintenance. Une piste carrossable située en tête de part et d'autre de la tranchée côté V1 permettent d'avoir accès en tout point de la tête de la tranchée.

Quatre butons, faisant office de passerelles pour permettre aux équipes de maintenance de passer d'un côté à l'autre de la tranchée, sont positionnés aux PK003+786, 004+170, 004+436, 004+907.

L'accès à la piste de maintenance située dans la tranchée, de 0,90 m de largeur côté V1 et côté V2, peut se faire soit en entrée ou sortie de tranchée, soit par un escalier métallique situé au PK004+438 côté V1.

### INSTRUMENTATION POUR LA SURVEILLANCE

Des piézomètres sont mis en place à l'arrière des têtes des parois moulées pour assurer un suivi des fluctuations

de la nappe du Sénonien pendant la durée de vie de l'ouvrage.

Les tubes piézométriques sont étanches jusqu'au toit de la couche de la Craie de Blois (craie blanche) et crépinés au-delà, soit environ à partir de la cote +57 NGF, afin de ne pas être perturbés par les niveaux de la nappe de l'Éocène.

Les piézomètres, au nombre de 8, sont positionnés de la manière suivante :

- Tous les 50 à 100 m entre les PK003+546 et 004+126, soit 5 piézomètres ;
- De manière plus espacée au-delà, soit 3 piézomètres.

Pour mesurer la pression hydrostatique à l'interface des deux couches d'argiles situées sous le radier, des lignes de deux capteurs de pression interstitielle (CPI) sont placés tous les 100 m environ entre le PK003+546 (début de la tranchée) et le PK004+126 au niveau de cette interface.

Les lignes de mesure sont situées au droit des mêmes PK que ceux des piézomètres.

On dispose l'un des deux CPI d'une ligne à l'axe de la tranchée, et l'autre au droit du dalot. Les lignes sont positionnées à équidistance des deux drains verticaux encadrants. Ce dispositif permet d'évaluer la pression « moyenne minimum » sous les argiles vertes, et de vérifier l'efficacité de ces drains de l'autre côté de la tranchée.

Deux capteurs supplémentaires sont mis en œuvre, l'un au droit du PK004+457 et l'autre au droit du PK004+556, dans la zone où les rapports d'étude hydrogéologique font apparaître un point haut piézométrique.

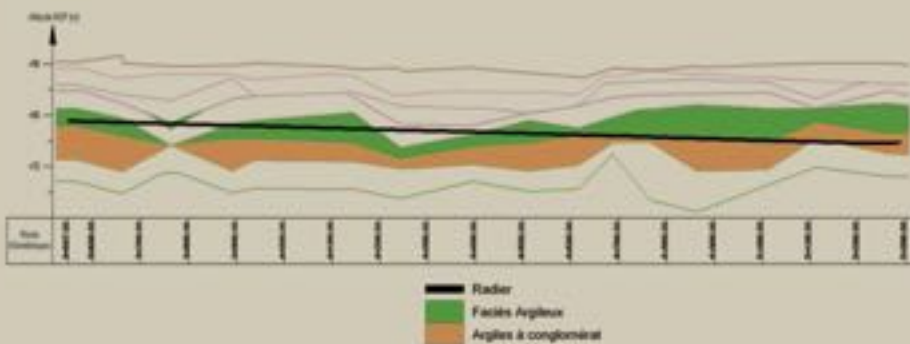
Afin de vérifier l'application d'un effort de compression axial à l'interface radier/paroi moulée, des mesures de contrainte seront effectuées dans le radier.

Ces mesures seront réalisées par l'intermédiaire d'extensomètres (jauges de contraintes) noyées dans le béton du radier à proximité de l'interface radier/paroi à une distance d'environ 20 cm du bord de paroi.

Les extensomètres sont placées dans les zones où la sensibilité au gonflement des argiles vertes a été jugée la plus significative, soit une section équipée au PK003+680 et une section équipée au PK004+180.

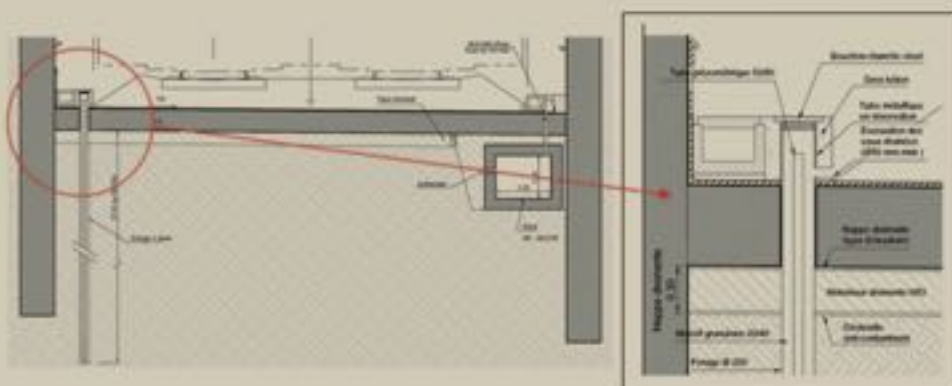
L'ensemble des différents dispositifs permet des mesures en continu qui sont récupérées par une centrale d'acquisition de données implantée au bord de la piste d'accès côté V1 en tête de tranchée.

## COUCHES D'ARGILES SOUS-JACENTES AU RADIER



© COSEA  
8

## DRAINAGE VERTICAL / ÉVACUATION DES EAUX



© COSEA  
9



La centrale d'acquisition est équipée d'un système d'alerte en cas de panne ou défaut (envoi de SMS ou de message sur ordinateur).

Les mesures pour le suivi de cette instrumentation seront réalisées par un système de monitoring et pourront être consultées à distance au Centre de supervision de Villognon, via Internet. Une visite annuelle de maintenance (changement de batterie des centrales d'acquisition, vérification du bon fonctionnement du dispositif) sera effectuée pour s'assurer de la pérennité des mesures par système électronique.

### PHASAGE DES TRAVAUX

Le nombre de structures différentes et dépendantes entre elles (parois moulées, butons, radier, drainages) a demandé un phasage assez précis en phase travaux. Le phasage général des travaux de génie civil est le suivant :

- 1- Terrassements initiaux avec pente à 5/2 et risberme de 7 m de largeur minimum au niveau z0 ;
- 2- Réalisation des murettes-guides ;
- 3- Réalisation des parois moulées (figure 10) ;
- 4- Excavation jusqu'à 4 m de profondeur pour permettre la pose des butons préfabriqués et le passage d'engins au-dessous ;
- 5- Mise en place des butons définitifs préfabriqués et clavage ;
- 6- Excavation jusqu'à 6,50 m de profondeur environ ;
- 7- Pose d'un lit de butons provisoires métalliques ;
- 8- Terrassement jusqu'au fond de fouille ;

9- Terrassement côté dalot jusqu'au niveau de pose du dalot et mise en place de l'ouvrage par éléments préfabriqués ;

10- Remblaiement et compactage de la couche drainante ;

11- Mise en place des CPI pour les profils instrumentés ;

12- Réalisation du radier par plots ;

13- Dépose des butons provisoires et terrassement côté terre en tête de parois pour la réalisation de la piste définitive ;

14- Rabotage des parois ;

15- Forage et mise en place des drains verticaux dans la zone de drains ;

16- Réalisation de l'étanchéité sur le radier et les superstructures.

Dans les zones de franchissement, les traverses en béton armé sont réalisées à la suite des parois moulées ; les travaux de terrassement et de butonnage provisoire sont réalisés « en taupe » (figure 10).

Les travaux de parois moulées sont réalisés au moyen de deux ateliers

en six phases. Les panneaux pour les fondations des traverses du pont-rail PRa0046, de la RD910 et de l'A85 correspondent aux trois premières phases, celles entre le pont-rail et la RD910 à la phase 4, ceux entre la fin de la tranchée et du pont-rail à la phase 5 et enfin ceux entre le début de la tranchée et l'A85 à la phase 6 (figure 11).

Les travaux de parois moulées se sont déroulés de juillet 2012 à octobre 2013.

10- Forage des parois moulées.

11- Vue de la tranchée couverte entre la RD910 et la VC11.

12- Travaux de terrassement dans la tranchée.

13- Butons métalliques provisoires.

10- Drilling the diaphragm walls.

11- View of the cut-and-cover tunnel between RD910 and VC11 roads.

12- Earthworks in the cut-and-cover.

13- Temporary metallic stays.



11

© PASCAL LE DOAIRE



12

© COSEA

© COSEA



10



13

© COSEA



Les travaux de terrassement et de génie civil à l'intérieur de la tranchée entre les parois moulées sont réalisés à l'avancement depuis l'extrémité sud de la tranchée qui est un point bas (figure 12).

Les butons préfabriqués, d'un poids de 12 t environ, sont acheminés par route à raison de deux par camion. Leur pose s'effectue à une cadence de 15 par jour environ.

Les butons métalliques provisoires (tubes de 716 mm de diamètre) sont mis en œuvre à l'avancement des terrassements avec un espacement de 5 m environ, à raison de 2 par panneau. Ils sont posés inclinés avec un

#### 14- Travaux de réalisation du radier.

#### 15- Vue de l'intérieur de la tranchée.

#### 14- Invert execution works.

#### 15- Interior view of the cut-and-cover tunnel.

angle de 3° environ pour tenir compte de la différence de profondeur entre les parois côté V1 et les parois côté V2. La mise en œuvre s'effectue à l'aide de vérins hydrauliques à positionner sur tête active, par mise en tension des butons à environ 90 bars contre les parois (figure 13).

Chaque plot du radier possède une longueur de 30 m et est réalisé à une cadence d'environ un plot par semaine (figures 14 et 15).

Une fois le plot de radier en béton réalisé, 6 butons métalliques sont déposés et réutilisés. Afin d'optimiser le cycle de production, 36 butons métalliques ont été utilisés.

### CONCLUSION

Les travaux de la tranchée de Veigné ont nécessité un phasage particulier et serré pour tenir compte des multiples tâches à réaliser en parallèle et des interactions entre les travaux des différentes structures constitutives de l'ouvrage et des dispositifs associés (drainages et instrumentation) ainsi que l'environnement périurbain du site. L'instrumentation mise en place permettra un suivi des fluctuations de la nappe profonde du Sénonien pendant la durée de vie de l'ouvrage.

Les travaux de génie civil, débutés en mai 2012, s'achèveront en février 2015. □

### PRINCIPALES QUANTITÉS

- **354** panneaux de parois moulées totalisant 45 000 m<sup>2</sup>
- **297** butons en béton préfabriqués
- Plus de **500 000** m<sup>3</sup> de terres excavées
- Plus de **55 000** m<sup>3</sup> de béton armé
- Près de **5 000** t d'acier pour béton armé

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Lisea

**MAÎTRE D'ŒUVRE ET DIRECTION DE PROJET :** Cosea (Systra / Vinci Construction)

**ENTREPRISES :** Cosea - Sous Groupement Infrastructure

- Génie Civil : Vinci Construction

- Instrumentation : Dynaopt

**CONTRÔLE EXTÉRIEUR :** Cosea - DPR

### ABSTRACT

#### VEIGNÉ CUT-AND-COVER, AN EXCEPTIONAL ENGINEERING STRUCTURE FOR THE SEA HSL

G. CAMPION, SYSTRA - J. OLIVE, SYSTRA - E. PRINGALLE, VINCI CONSTRUCTION

**The Veigné cut-and-cover tunnel**, an exceptional engineering structure for the future South Europe Atlantic high-speed rail line (SEA HSL) between Tours and Bordeaux, was executed in a difficult geotechnical and hydrogeological environment. The structure, 1750 metres long, is formed of stayed diaphragm walls at the top and a reinforced concrete invert at the base supporting the future railway tracks for the line. It has special drainage systems and instrumentation to monitor fluctuations in the aquifer located near the invert throughout the structure's service life. The works required precise sequencing given the length of the tunnel and the various structures of which it is formed. □

#### FALSO TÚNEL DE VEIGNÉ, EXCEPCIONAL OBRA DE INGENIERÍA DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD SUR EUROPA ATLÁNTICO (LGV SEA)

G. CAMPION, SYSTRA - J. OLIVE, SYSTRA - E. PRINGALLE, VINCI CONSTRUCTION

**El falso túnel de Veigné**, excepcional obra de ingeniería de la futura línea de alta velocidad Sur Europa Atlántico entre Tours y Burdeos, se ha realizado en un difícil contexto geotécnico e hidrogeológico. La estructura, de 1.750 m de longitud, está constituida de paredes moldeadas acodadas en su parte superior y de una solera de hormigón armado en la inferior que sostiene las futuras vías ferroviarias de la línea. Cuenta con dispositivos específicos de drenaje y una instrumentación que permite un seguimiento de las fluctuaciones de la capa freática situada cerca de la solera durante la vida útil de la estructura. Las obras requirieron un calendario de ejecución preciso teniendo en cuenta la longitud de la estructura y las diferentes construcciones que la componen. □





1  
© PHOTOThÈQUE SYSTRA

# LE VIADUC SUR L'OUED SEBOU DE LA LGV TANGER-KÉNITRA

AUTEURS : SÉBASTIEN FORESTIER, RESPONSABLE VIADUC DU SEBOU + TOARC 7 / MOE-GC-SUD, SYSTRA  
NABIL EL IDRISSE, INGÉNIEUR OA / MOE-GC-SUD, SYSTRA - ALAIN HOCKE, DIRECTEUR DE PROJET / MOE-GC-SUD, SYSTRA

RÉALISATION DU VIADUC DU SEBOU, PREMIER VIADUC FERROVIAIRE DU MAROC CONSTRUIT PAR LE PROCÉDÉ D'ENCORBELLEMENTS SUCCESSIFS DE VOUSOIRS COULÉS EN PLACE, S'INSCRIVANT DANS LA RÉALISATION DE LA PREMIÈRE LGV AFRICAINE.

## CONTEXTE GÉNÉRAL DONNÉES GÉNÉRALES DU PROJET

Le projet marocain de Ligne à Grande Vitesse Tanger-Kenitra, d'une longueur d'environ 200 km, constitue la première étape de la branche LGV Atlantique reliant Tanger à Casablanca.

Il s'agit de la première LGV du continent africain.

Ces 200 km sont divisés en 2 tronçons d'environ 100 km chacun :

- Le tronçon Nord part de Tanger pour traverser une zone semi-montagneuse et arrive à Larache ;
- Le tronçon Sud va de Larache

jusqu'à Kenitra et s'inscrit dans une zone littorale traversant la plaine du Gharb avec un relief beaucoup moins accidenté que le premier tronçon.

Le tronçon Sud est divisé en plusieurs marchés de construction, notamment :

- Le traitement des zones compressibles (faisant l'objet de marchés anticipés) ;
- 4 TOARC (Terrassement, Ouvrage d'Art et Rétablissement de Communications) ;
- Un ouvrage d'art non courant : le viaduc du Sebou objet du présent document.

**1- Ligne d'appui Sud de la travée 2 - butée bloquant le tablier dans les 2 directions.**

**1- South support line for span 2 - abutment blocking the deck in both directions.**

## DONNÉES GÉNÉRALES DE L'OUVRAGE

Le viaduc du Sebou est situé dans la vallée du Gharb entre les PK 182+958 et 183+208 de la future LGV et s'insère entre le TOARC 6 et le TOARC 7. Il permet le franchissement de l'Oued Sebou.

Cet oued, bien qu'étant un des plus importants du Maroc, n'est pas navigable. Par contre, sa proximité avec l'océan fait qu'il est soumis aux marées (zone de marnage pouvant dépasser 2 m). Il est aussi à noter que les remblais d'accès situés de part et d'autre de l'ouvrage sont situés sur

une zone compressible et inondable. Suite à un appel d'offre international, le marché de travaux a été attribué à l'entreprise marocaine SGTM pour un montant TTC de 155 081 364 MAD (soit 14,2 millions d'euros). La durée de réalisation est de 21 mois comprenant une phase préparatoire de 2 mois.

**DESCRIPTION DU VIADUC**  
**DONNÉES FONCTIONNELLES**

Le profil en long de l'ouvrage est un cercle de 21 000 m de rayon dont le sommet est centré sur l'ouvrage (figure 2) ; le tracé en plan est en alignement droit.

**2- Coupe longitudinale de l'ouvrage.**

**3- Sections types du tablier.**

**2- Longitudinal section of the structure.**

**3- Typical cross sections of the deck.**

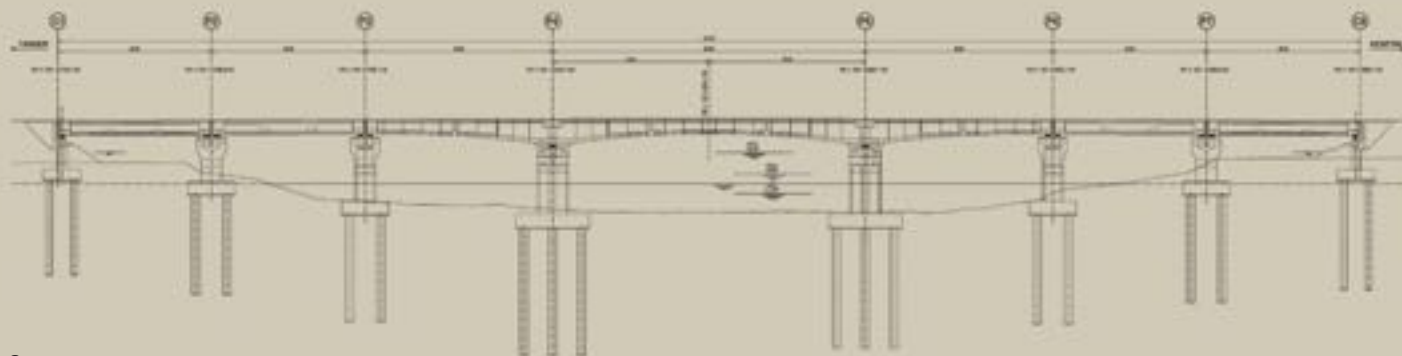
La largeur totale du tablier est de 12,75 m, il porte 2 voies ferroviaires ayant un entraxe de 4,50 m (figure 3). Les voies sont ballastées et les traverses sont en béton monobloc. La vitesse retenue pour la conception est de 350 km/h. La durée de vie de l'ouvrage est de 100 ans.

**LE TABLIER**

Le tablier est composé de 7 travées constituées par un caisson en béton précontraint. Les deux culées délimitant l'ouvrage sont distantes de 250 m. Les piles

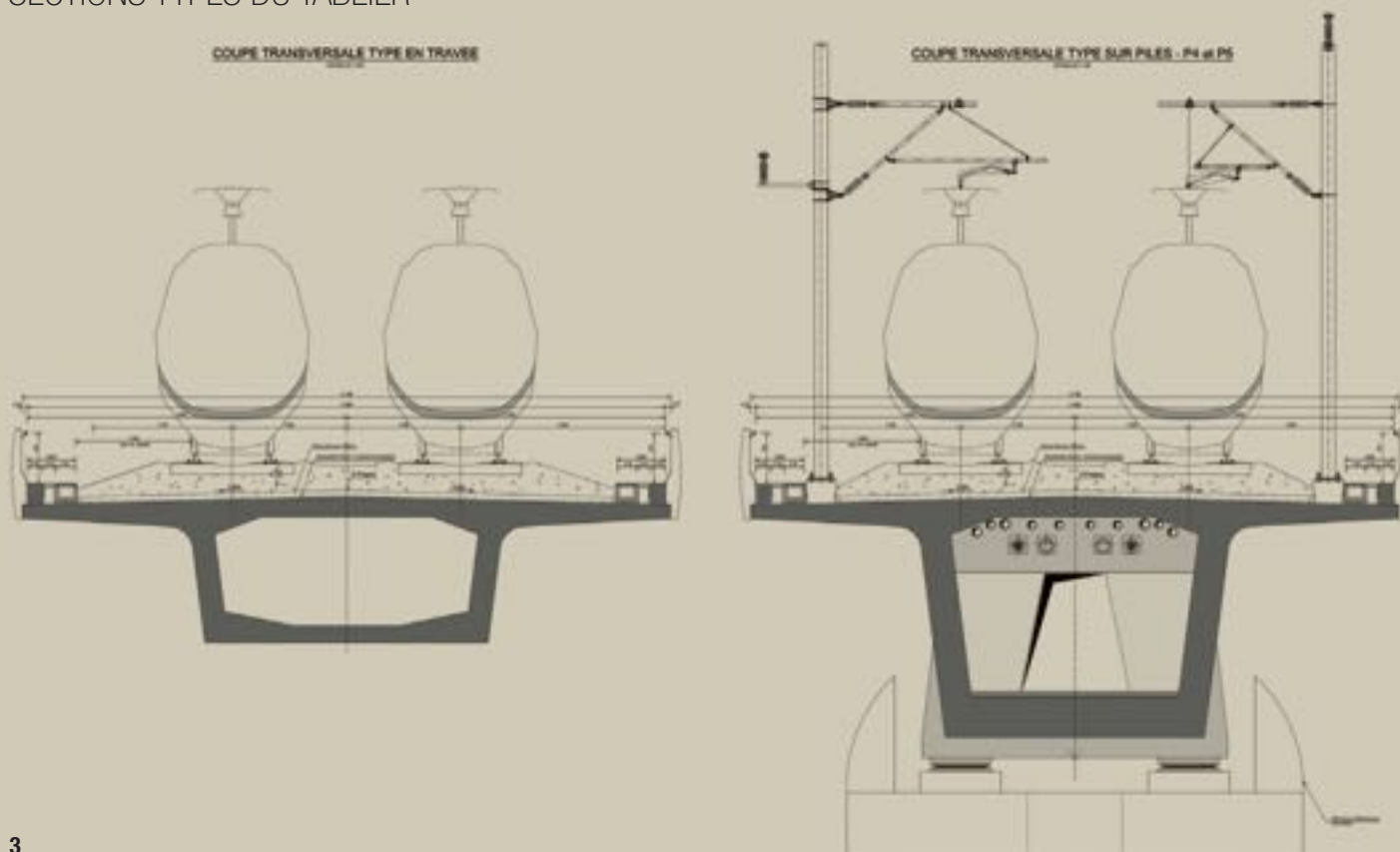
implantées dans le lit majeur de l'oued sont réparties selon le travelage suivant : 29,50 m - 29,50 m - 36 m - 60 m - 36 m - 29,50 m - 29,50 m. Les 4 travées de rives (2 de part et d'autre) sont constituées par des tabliers isostatiques ayant une hauteur constante de 2,85 m (soit un élanement proche de 1/10). La partie centrale (36 m + 60 m + 36 m) est constituée d'un tablier continu dont la hauteur varie paraboliquement entre 2,85 m à la clé (soit un élanement de 1/21) et 5,12 m sur les appuis P4 et P5 (élanement de 1/12). Le béton des tabliers est un C40/50. ▷

COUPE LONGITUDINALE DE L'OUVRAGE



2

SECTIONS TYPES DU TABLIER



3





4



5



6

© PHOTO THÉQUE SYSTRA

Les lignes d'appuis de P4 et P5 sont bloquées longitudinalement de manière à répartir les efforts longitudinaux mais aussi pour s'affranchir d'appareils de dilatation de voie (coûteux aussi bien à l'achat qu'en maintenance). La plus grande longueur dilatable de tablier est donc de 66 m (entre l'axe de l'ouvrage et la pile P3 ou la pile P6).

#### LES PILES

Les piles P2, P3, P6 et P7 sont constituées de fûts circulaires ayant un diamètre extérieur de 4 m.

Ces piles sont coiffées de chevêtres portant chacun 2 lignes d'appuis. Ces chevêtres ont une forme résultant de l'intersection entre un parallépipède rectangle et un cône tronqué inversé permettant de faire varier la section d'un contour circulaire à un contour carré. Alors que P2 et P7 sont des piles pleines, P3 et P6 sont creuses avec des voiles de 0,50 m d'épaisseur.

Les piles P4 et P5, pour des raisons d'écoulement hydraulique de l'oued, ont une section composée par l'intersection de 2 ellipses et sont creuses (voiles de 0,50 m d'épaisseur).

Le béton des piles est un C35/45. En phase définitive, les piles P4 et P5 sont équipées d'une seule file d'appuis

pareils d'appui. Sur P2, P3, P6, P7 reposent deux files de deux appareils d'appui.

Tous les appareils d'appui de l'ouvrage sont des appareils d'appui à pot multidirectionnels (libres dans les 2 directions du plan horizontal)

Les blocages sur les lignes d'appuis aussi bien dans le sens transversal que longitudinal sont réalisés par des butées métalliques solidaires des chevêtres. Ces butées permettent de reprendre les efforts sismiques et tous

les efforts horizontaux de service et viennent s'insérer entre les appareils d'appui à pot sur chaque ligne d'appui. La figure 1 montre la ligne d'appui Sud du tablier de la travée 2 où l'on distingue la butée bloquant le tablier dans les 2 directions longitudinale et transversale.

Le blocage transversal est assuré par des patins en élastomère fretté disposés dans le plan vertical entre l'entretoise d'about du tablier et la butée métallique.



7

© PHOTO THÉQUE SYSTRA

**4- Réalisation du batardeau en matériau de remblai.**

**5- Mise en place des enrochements de protection sur le remblai d'accès.**

**6- Atelier de colonnes ballastées sur la berge Sud.**

**7- Terrassement à l'intérieur du batardeau de P5.**

**4- Execution of the cofferdam in fill material.**

**5- Putting in place protective riprap on the access embankment.**

**6- Ballasted column equipment on the South bank.**

**7- Earthworks inside the P5 cofferdam.**

Le blocage longitudinal est assuré par 4 barres de précontrainte reliant l'entretoise d'about du tablier et la butée métallique.

## LES CULÉES ET BLOCS TECHNIQUES

Les remblais attenants à l'ouvrage se trouvent sur des sols compressibles (dépôts alluvionnaires de la plaine du Sebou), ils ont fait l'objet d'un préchargement avec des drains verticaux dans le but de consolider les sols.

Cependant, ce traitement réalisé dans le cadre d'un autre marché n'a pu être réalisé sous les blocs techniques de l'ouvrage, faute de temps. Il a donc fallu, afin de ne pas retarder l'exécution du viaduc et de ses blocs techniques, avoir recours à une solution alternative pour ne pas réaliser les blocs techniques sur des sols non consolidés. Pour cela, il a été choisi de traiter l'assise des blocs techniques par des colonnes ballastées mises en place afin d'accélérer les tassements.

## LES FONDATIONS

Les fondations profondes de l'ouvrage sont des pieux s'ancrant dans des sables légèrement grésifiés.

Toutes les piles sont fondées sur des pieux de 1,50 m de diamètre alors que les culées sont fondées sur des pieux de 1,20 m de diamètre.

Il est à noter que les pieux des culées sont réalisés après consolidation des sols supports des blocs techniques afin de ne pas induire des efforts négatifs dans ces derniers.

Compte tenu de la proximité de l'oued, la totalité des pieux a été forée sous boue bentonitique.

Le béton pour les fondations est un C30/37.

## LA RÉALISATION L'ESTACADE MÉTALLIQUE

Il était initialement prévu une estacade métallique provisoire reliant les deux berges et permettant l'accès au chantier de chaque pile.

En phase de réalisation, l'entreprise a proposé de remplacer les extrémités de l'estacade métallique par des remblais immergés partant des berges.

Le corps de ce remblai a été réalisé à l'intérieur d'un batardeau (figure 4). Une fois le batardeau remblayé, une protection par enrochements posés sur un géotextile a été réalisée afin de limiter les effets de l'érosion dus à la marée (figure 5).

Ces remblais additionnels ont permis de créer des plateformes directement accessibles au droit de P2, P3, P6 et P7. L'estacade métallique a pu ensuite être réalisée suivant le phasage suivant :

- Fonçage de tubes métalliques dans le lit de l'oued grâce à un guide prenant appuis sur les files de tubes déjà foncés ;
- Pose de tronçons de charpente métallique préassemblés ;
- Pose de prédalle en béton pour la partie circulaire de l'ouvrage provisoire.

## COLONNES BALLASTÉES SOUS CULÉES ET BLOCS TECHNIQUES

Le traitement par colonnes ballastées de l'assise des blocs techniques a débuté en priorité afin que la réalisation des pieux des culées se fasse une fois la consolidation du sol atteinte de manière à éviter les surcharges dues aux frottements négatifs sur les fondations profondes (figure 6).

Les caractéristiques des colonnes mises en place sont les suivantes :

- Procédé de mise en place par voie humide ;
- Maille de 1,80 m ;
- Diamètre 0,80 m ;
- Profondeur 11 m (berge Sud), de 11 à 15 m (berge Nord) ;
- Granularité du matériau de remplissage 8/40 ou 20/63 ;
- Durée prévue de consolidation 6 mois.

Les culées et les blocs techniques ont ensuite été réalisés de manière traditionnelle. ▷

8- Bétonnage du bouchon de P4.

9- Travée 6 et son cintre.

10- Réalisation du VSP sur pile P5.

8- Concreting the cap of P4.

9- Span 6 and its centre.

10- Execution of the segment on pier P5.



8



9



10



## LES BATARDEAUX ET LES APPUIS

Tous les appuis de l'ouvrage ont été réalisés à l'abri de batardeaux de palplanches.

Les modules utilisés varient d'AZ20 pour les piles de rives à AZ36 pour les piles centrales avec des longueurs maximales de 30 m pour ces dernières. Le phasage de réalisation pour P2, P3, P6 et P7 a été le suivant compte tenu de la présence des remblais d'accès à l'estacade :

- Réalisation des pieux depuis les remblais d'accès à l'estacade ;
- Fonçage des palplanches ;
- Terrassement à l'intérieur du batardeau avec pompage des eaux et pose de liernes à l'avancement ;
- Réalisation d'un bouchon hydraulique ;
- Recépage des pieux ;
- Réalisation de la semelle ;
- Réalisation du fût de pile puis chevêtre ;

Pour P3 et P4, le phasage a été le suivant :

- Fonçage des palplanches ;
- Remblaiement du batardeau avec matériaux de remplissage afin d'obtenir une plateforme de travail pour la machine à pieux ;
- Forage des pieux ;
- Terrassement à l'intérieur du batardeau avec pompage des eaux et pose de liernes à l'avancement (figure 7) ;
- Réalisation d'un bouchon hydraulique (figure 8) ;
- Recépage des pieux ;
- Réalisation de la semelle ;
- Réalisation du fût de pile puis chevêtre.

## LES TABLIERS ISOSTATIQUES (TRAVÉES 1, 2, 6 ET 7)

Les tabliers isostatiques de rives ont été réalisés sur un cintre général ayant pour assise les remblais d'accès à l'estacade et les semelles des appuis adjacents (figure 9).

Ces tabliers ont été bétonnés en 2 phases, tout d'abord les hourdis et goussets inférieurs avec l'amorce des âmes, puis les âmes et le hourdis supérieur.

Chaque tablier comporte 10 câbles intérieurs au béton d'unité 19T15s. Après mise en tension des câbles et décintrement du tablier, le cintre est déposé puis déplacé sur la travée suivante.

En outre, ces travées disposent chacune de 4 gaines vides extérieures au béton de type 19T15S.



11

© PHOTO THÉQUE SYSTRA

## LE TABLIER CONTINU (TRAVÉES 3, 4 ET 5)

La réalisation des VSP (voussoirs sur pile) a nécessité le montage de plateformes de travail en tête des piles P4 et P5. Ces dernières reposent sur des consoles métalliques et viennent s'appuyer sur le chevêtre de chaque pile (figure 10).

Les VSP d'une longueur de 9 m ont été bétonnés en 3 phases.

Pour la phase de construction des fléaux, ces derniers ont été posés sur 4 cales en béton fretté puis cloués sur leur pile respective par 16 barres de précontrainte de diamètre 50 mm venant s'ancrer à l'intérieur de la pile en sous-face des chevêtres.

Dès la phase d'appel d'offre et malgré le faible linéaire de tablier à réaliser, il a été décidé d'avoir recours à 2 paires d'équipages mobiles (permettant la construction des 2 fléaux quasiment en parallèle) afin de sécuriser le planning de l'ouvrage qui est sur le chemin critique du projet.

L'entreprise a opté pour des paires d'équipages mobiles par le dessous fournis par NRS (figures 11 et 12).

Chaque fléau a été découpé en 16 voussoirs courants (8 de part et d'autre des VSP) ayant une longueur variant de 3 m (pour les voussoirs proches du VSP) à 3,60 m.

Le câblage de fléau est constitué par une précontrainte intérieure au béton constituée de 2 câbles 19T15s reliant chaque paire de voussoirs réalisés.



12

© PHOTO THÉQUE SYSTRA

**11- Montage de l'équipage mobile sur P4.**

**12- Mounting the mobile rig on P4.**  
**12- Mobile rig mounted on cantilever section 5.**

Le cycle de réalisation pour chaque paire de voussoirs a été d'une semaine avec préfabrication de cages d'armatures et bétonnage en 2 phases (figures 13 et 14) :

- Le hourdis inférieur avec ces goussets ;
- Les âmes ainsi que le hourdis supérieur.

Le clavage des 2 fléaux au centre de l'ouvrage est réalisé à l'aide d'un voussoir de clé de 2,50 m et de la mise en

place de câbles éclisses en travée centrale. Cette précontrainte est constituée de 6 câbles 19T15s intérieurs au béton. Afin d'accoster sur les piles de rives (P3) et (P6), la réalisation du tablier s'est poursuivie par la réalisation d'un voussoir en surencorbellement puis de l'about du tablier réalisé à partir d'un coffrage reposant sur les semelles de P3 et P6. Le câblage éclipse des travées latérales est réalisé à l'aide de 4 câbles 12T15s intérieurs au béton. Pour achever ce tablier à 3 travées, un

**13- Vue générale du fléau 5 en cours de construction.**

**14- Vue générale des 2 fléaux en cours de réalisation.**

**13- General view of cantilever section 5 undergoing construction.**

**14- General view of the 2 cantilever sections undergoing construction.**

câblage extérieur de continuité a été mis en œuvre suivant un tracé polygonal à l'aide de déviateurs situés à l'intérieur du caisson.

Ce câblage est remplaçable, il est constitué de 12 câbles 27T15s à torons gainés-graissés, avec injection générale de la gaine au coulis de ciment.

Chaque travée a aussi été équipée de 2 gaines vides pouvant recevoir des câbles 27T15s, cette précontrainte additionnelle pouvant être mise en œuvre pendant la vie de l'ouvrage.

## CONCLUSION

Le viaduc du Sebou est aujourd'hui en cours de finition (mise en place d'encrochements de protection, dépose de l'estacade, mise en œuvre de l'étanchéité et de l'enrobé sur le tablier).

Il s'agit de la première réalisation d'un ouvrage d'art non-courant pour le projet mais c'est aussi le premier tablier-caisson en béton précontraint du continent africain supportant une Ligne à Grande Vitesse. □



## PRINCIPALES QUANTITÉS

FONDATION  
(Y COMPRIS SEMELLES)

**BÉTON : 3211 m<sup>3</sup>**

**ACIER : 353 t (110 kg/m<sup>3</sup>)**

APPUIS  
(CULÉES + PILES)

**BÉTON : 1231 m<sup>3</sup>**

**ACIER : 224 t (182 kg/m<sup>3</sup>)**

TABLIER

**BÉTON : 2876 m<sup>3</sup>**

**ACIER : 402 t (140 kg/m<sup>3</sup>)**

**PRÉCONTRAÎTE : 93 t  
(32 kg/m<sup>3</sup>)**



## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE : ONCF**

**ASSISTANT DU MAÎTRE D'OUVRAGE : SNCF-International**

**MAÎTRE D'ŒUVRE GÉNIE CIVIL : Groupement Systra / Systra Maroc / Cid / Team Maroc**

**COORDONATEUR SPS : Bureau Véritas Maroc**

**ENTREPRISE : Sgtn**

**CONTRÔLE EXTERNE : Lpee**

## ABSTRACT

### THE VIADUCT OVER WADI SEBOU FOR THE TANGIER-KENITRA HSL

SÉBASTIEN FORESTIER, SYSTRA - NABIL EL IDRISSE, SYSTRA - ALAIN HOCKE, SYSTRA

The viaduct over Wadi Sebou is the first non-standard engineering structure for the first high-speed rail line on the African continent, on the first stage of the Atlantic branch for the high-speed train connecting Tangier and Casablanca. The distinctive feature of this structure is its construction method by cantilevering of cast-in-situ segments. This is the first time that this process has been used in Morocco for a rail bridge deck. Despite the short length of the viaduct, numerous technical processes had to be employed for its execution. □

### EL VIADUCTO SOBRE EL RÍO SEBÚ DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD TÁNGER-KENITRA

SÉBASTIEN FORESTIER, SYSTRA - NABIL EL IDRISSE, SYSTRA - ALAIN HOCKE, SYSTRA

El viaducto sobre el río Sebú es la primera obra de ingeniería no corriente de la primera línea de alta velocidad del continente africano, en la etapa inicial de la rama atlántica del tren de alta velocidad que comunica Tánger con Casablanca. Esta estructura se distingue por su método de construcción por voladizos de dovelas coladas in situ. Es la primera vez que se emplea este procedimiento en Marruecos en un tablero ferroviario. A pesar de la reducida longitud del viaducto, fue preciso recurrir a numerosos procedimientos para su realización. □



# PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET DE LA LGV BPL

AUTEURS : MARC LEGRAND, PRÉSIDENT D'EIFPAGE RAIL EXPRESS (ERE) - MICHEL OLEO, DIRECTEUR DE PROJET, CONSTRUCTION DE LA LIGNE EIFFAGE RAIL EXPRESS (CLERE)

LE PROJET DE LA LIGNE FERROVIAIRE À GRANDE VITESSE BRETAGNE - PAYS DE LA LOIRE, DESTINÉE À RELIER LE MANS À RENNES, A ÉTÉ CONFÉ PAR RFF AU GROUPE EIFFAGE, DANS LE CADRE D'UN CONTRAT DE PARTENARIAT PUBLIC-PRIVÉ. IL CONSISTE EN LA RÉALISATION D'UNE PLATEFORME FERROVIAIRE À GRANDE VITESSE EN DOUBLE VOIE DE 214 KM DONT 32 KM DE RACCORDEMENTS VERS LES LIGNES EXISTANTES. CETTE LIGNE NOUVELLE DONT LA MISE EN SERVICE EST PRÉVUE LE 15 MAI 2017, PERMETTRA UN GAIN DE PRÈS DE 40 MINUTES SUR LE TRAJET EN TGV ENTRE PARIS ET RENNES.

## INTRODUCTION

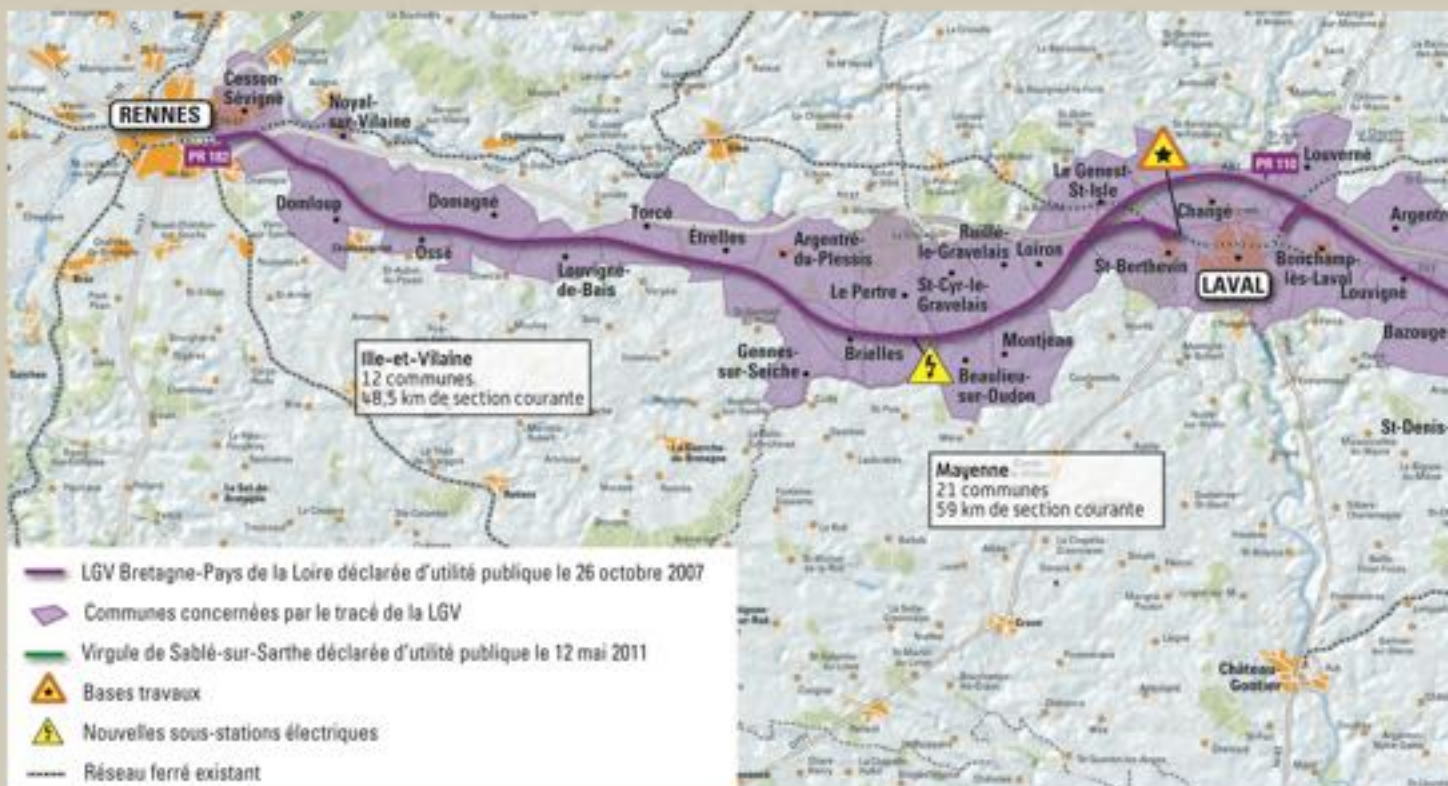
Le projet de ligne à grande vitesse Bretagne - Pays de la Loire (appelé LGV BPL) est destiné à relier à grande vitesse (320 km/h) Le Mans à Rennes. Il s'inscrit donc dans le prolongement de la LGV Atlantique Paris-Le Mans et permettra de mettre Rennes à moins

de 1h30 de Paris, soit un gain de 37 minutes par rapport à la situation actuelle. Ce projet intègre également une composante intra-régionale, ce qui permettra de réduire de façon significative la durée des trajets entre Laval, Angers et Nantes. Traversant deux régions (Bretagne, Pays de la Loire) et

trois départements : Sarthe, Mayenne et Ile-et-Vilaine, le tracé de la ligne (figure 1) résulte du meilleur compromis entre les enjeux techniques, économiques, humains et environnementaux. Elle s'étend sur 182 km auxquels s'ajoutent 32 km de raccordements au réseau ferré existant. Outre Le Mans et

Rennes, la ville de Laval sera desservie. Le financement, la conception finale, la construction et la maintenance de la LGV ont été confiés par RFF à Eiffage Rail Express (figure 2), dans le cadre d'un partenariat public-privé d'une durée de 25 ans à compter du 3 août 2011.

## TRACÉ DE LA LGV BPL



## AVANT-PROPOS DE MARC LEGRAND

La Ligne Ferroviaire à Grande Vitesse Bretagne Pays de la Loire (BPL) permettra, à partir du 15 mai 2017, de gagner près de 40 minutes sur les meilleurs temps de trajets en TGV entre la Bretagne et Paris et d'offrir une desserte ferroviaire de qualité entre Laval et Angers et Nantes. Réseau Ferré de France a choisi Eiffage pour concevoir, réaliser et livrer clé en main cette ligne nouvelle. Le contrat de partenariat entre RFF et Eiffage, entré en vigueur le 3 août 2011, constitue un nouveau défi pour le groupe. Pour le relever, pour livrer la ligne dans le strict respect du délai et des exigences de qualité et de sécurité, Eiffage s'appuie sur son expérience des grands projets et notamment de la Ligne Ferroviaire à Grande Vitesse Perpignan-Figueras et de l'Autoroute Pau-Langon, première autoroute construite après le Grenelle de l'environnement.

Michel Oléo qui, après avoir exercé des responsabilités de premier plan dans ces deux opérations, dirige aujourd'hui le projet Bretagne - Pays de la Loire est le mieux placé pour en décrire les principales caractéristiques dans cet article. Cette opération - la plus importante jamais réalisée par Eiffage - mobilise l'énergie du groupe. À l'heure où le génie civil et les terrassements entrent dans leur phase terminale, elle aura permis de former aux métiers des travaux publics près d'un millier de Bretons et de Ligériens. Les auteurs de ces lignes et des articles qui suivent souhaitent qu'après BPL, d'autres projets d'envergure viennent ainsi offrir à nos concitoyens de nouvelles perspectives d'épanouissement professionnel en même temps qu'ils contribueront à la modernisation des infrastructures de notre pays.

### LE FINANCEMENT

Le projet se déroule dans le cadre d'un contrat de PPP, signé entre Réseau Ferré de France (RFF) et Eiffage Rail Express (ERE), filiale à 100 % d'Eiffage. Il prévoit à partir de la mise à disposition de la ligne (15 mai 2017) et jusqu'à 2036 le versement par RFF à ERE d'un loyer annuel qui assure une triple fonction :

- Rémunérer forfaitairement la prestation d'entretien de la ligne ;
- Assurer le service de la dette ;
- Rémunérer les fonds propres investis par Eiffage.

En effet, le projet qui représente un investissement de 3 milliards d'euros (figure 3) est subventionné par RFF et différentes collectivités locales (la part la plus importante apportée par les collectivités locales est fournie par la Région Bretagne) à hauteur de 1 850 M€.

Le solde est apporté par Eiffage, soit sous forme de fonds propres (120 M€), soit sous forme d'un emprunt (1 030 M€) contracté par Eiffage Rail Express auprès de la Banque Européenne d'Investissement, de la Caisse des Dépôts et Consignations et de 12 grandes banques commerciales.

nement ainsi que le Rail) et Eiffage Énergie (Équipements Ferroviaires, c'est-à-dire la partie process de ce projet clefs en mains). C'est donc naturellement que ces deux branches ont créé conjointement la structure responsable de la conception et de la construction, le Groupement d'Intérêt Économique CLERE (Construction de la Ligne Eiffage Rail Express). Ce GIE est également responsable en amont de l'obtention des autorisations administratives nécessaires aux travaux et en aval à l'homologation de la ligne et l'obtention de l'Autorisation de Mise en Service Commercial.

L'organisation mise en place vise en premier lieu l'intégration interbranches ainsi qu'avec les partenaires extérieurs, la remontée rapide et complète de l'information au niveau de la direction de projet et de chaque échelon décisionnel, la capacité de gestion des risques et de prises de décisions rapides.

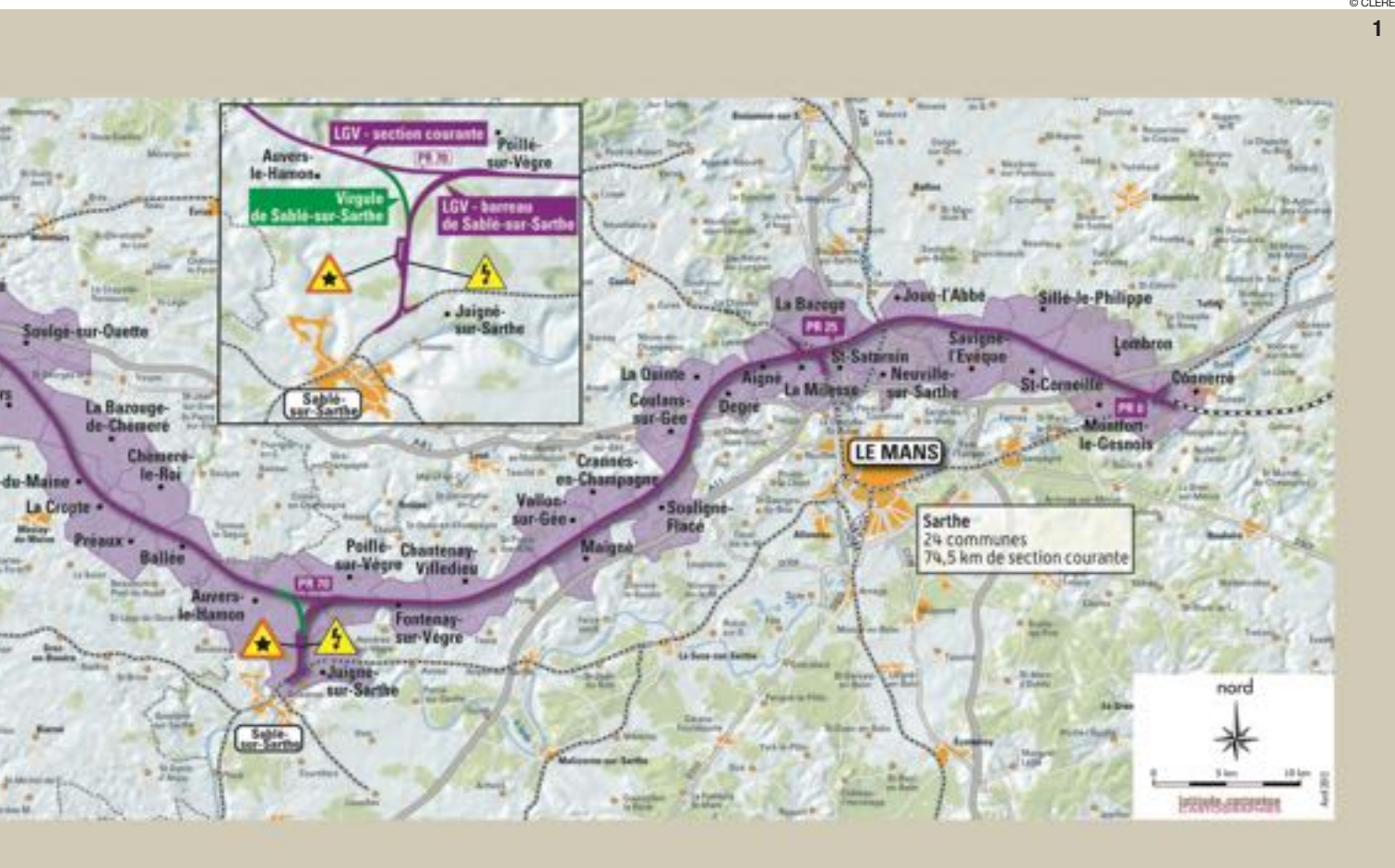
Ainsi cette organisation apparaît-elle in-fine comme claire, lisible, limitant autant que de possible les interfaces internes et fonctionnant au quotidien réellement telle que décrite grâce aux divers processus mis en places rapidement en début de projet. ▷

1- Tracé de la LGV BPL.

1- Alignment of the BPL HSL.

### ORGANISATION GÉNÉRALE

Au sein d'Eiffage, les compétences principales nécessaires au projet se trouvent dans les branches Travaux Publics (Terrassements, Ouvrages d'Arts, Génie-civil, Routes, Environ-

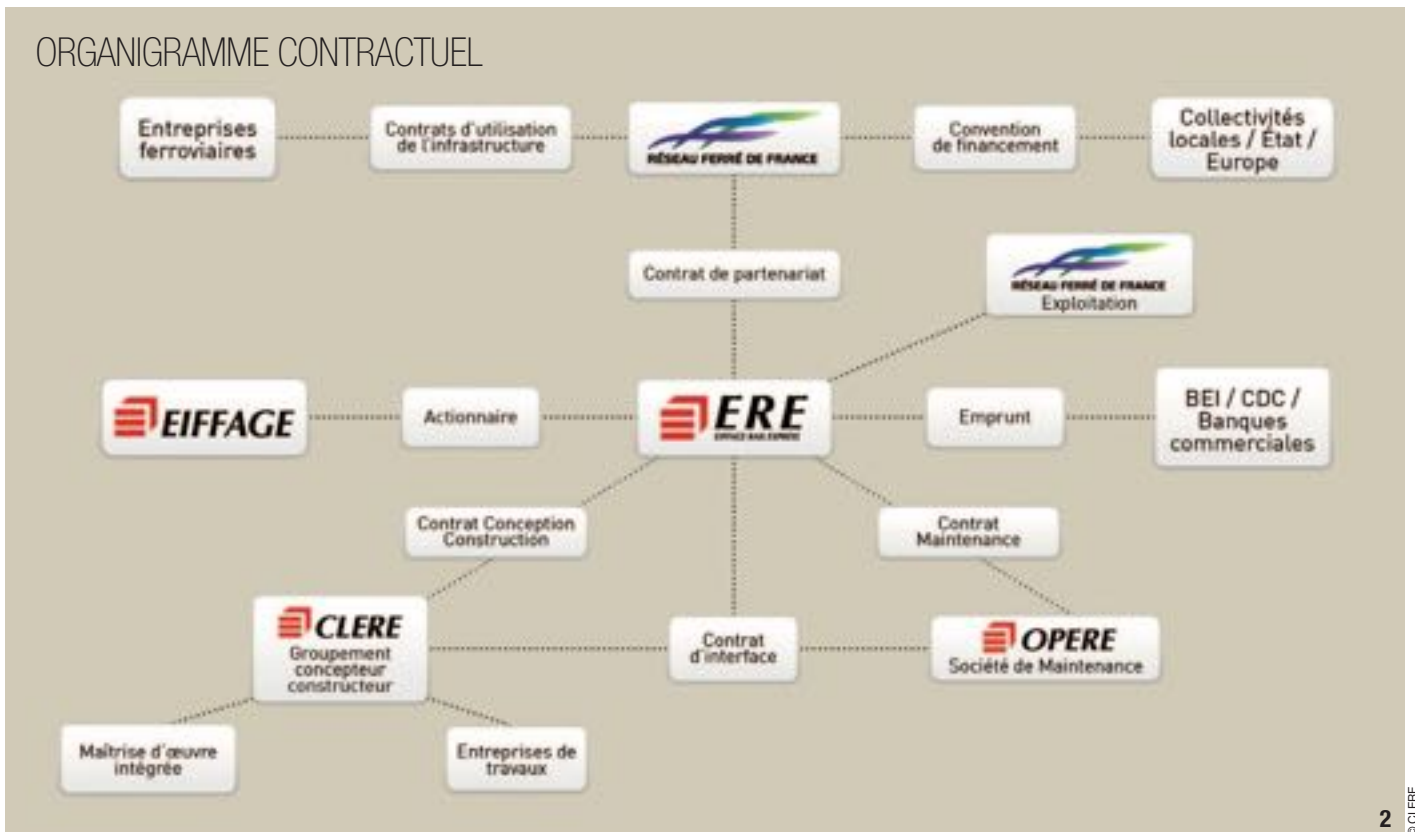


© CLERE

1



ORGANIGRAMME CONTRACTUEL



2 © CLERE

Procédant de la même réflexion, une structure unique et globale a été créée pour réaliser la conception du projet. Le sous-groupe d'ingénierie regroupe les compétences nécessaires mobilisées par Setec, Ingerop, Eiffage Travaux publics et Eiffage Energie. La maîtrise du process ferroviaire passe par des partenariats industriels privilégiés comme pour la signalisation avec Ansaldo ASTS. Comme pour le GIE, l'intégration des équipes, des compétences et des cultures a été le maître mot. La MOEG (Maîtrise d'Œuvre Générale) structure de pilotage de l'ingénierie, regroupe toutes les entités en un lieu unique

à Rennes avec la direction de projet du GIE. C'est cette structure qui organise le débat conceptuel et procède in fine aux décisions de conception dans le meilleur intérêt global du projet, y compris dans la composante maintenance. Empreinte de la culture de l'Ingénierie Systèmes, la MOEG laisse une place prépondérante en son sein à l'organisation permettant dans tous les processus de conception et des essais de maîtriser l'interaction des divers sous-systèmes constitutifs du projet. D'où l'attention particulière portée à la gestion des interfaces, la gestion des configurations ainsi que l'intégration.

2- Organigramme contractuel.  
3- Répartition du financement.

2- Contractual organisation chart.  
3- Breakdown of financing.

**CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE LA LGV BPL LA PLATEFORME GÉNIE CIVIL**

Le tracé est conçu pour une vitesse de 350 km/h et une exploitation de la ligne à 320 km/h. La LGV impacte soixante-quatre communes et traverse la région Pays de la Loire à travers les départements de la Sarthe et de la Mayenne ainsi que la région Bretagne, dans le département de l'Ille-et-Vilaine. Enfin la partie nord du Mans sera circulée par des trains fret à 100 km/h entre Conneré et La Milesse. La plateforme Génie Civil est réalisée en sept TOARC (figure 4) d'une longueur maximum de 30 km chacun. Le détail du projet de cette plateforme est détaillé dans les différents articles qui suivent. En revanche, une ligne LGV c'est aussi et surtout des équipements ferroviaires, la plateforme GC ne constituant que la fondation de la voie ferrée et les accès qui permettront sa maintenance.

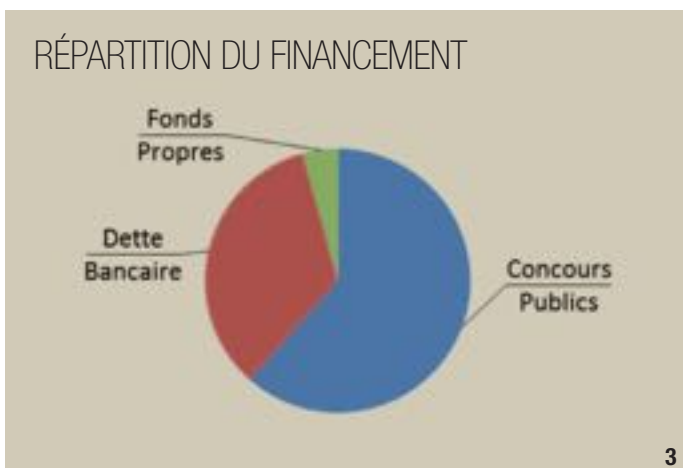
**TRAVAUX ET PLANNING**

Au niveau de la répartition des travaux, on retrouve la même volonté de limiter le morcellement. Une entité unique existe donc par pôle de compétence : plateforme ferroviaire, voie, équipements ferroviaires, bâtiments. Chacune de ces structures travaux s'organise avec les mêmes objectifs de clarté, de lisibilité et d'efficacité que ceux déclinés par la direction de projet au sein du GIE. À ce stade d'avancement du projet (figure 5), alors que la conception est achevée, que la plateforme ferroviaire se termine, que les travaux d'équipement ferroviaires sont bien lancés et que débute l'activité de pose de voies, le respect total des objectifs initiaux fixé en interne par le groupe Eiffage apporte la meilleure des démonstrations de la maîtrise de cette compétence qui s'ajoute à tous les autres métiers du groupe, à savoir celle d'être intégrateur d'un projet complexe tel que cette LGV BPL.

**LES ÉQUIPEMENTS FERROVIAIRES**

Les plus de 800 km de rail seront installés à l'aide d'un train de pose à partir de deux bases travaux, une dans la Sarthe au niveau du raccordement de Sablé sur Sarthe et une en Ille-et-Vilaine au niveau du raccordement de Laval Est. Un pré-ballastage de 20 cm sera mis en place au préalable à partir

RÉPARTITION DU FINANCEMENT



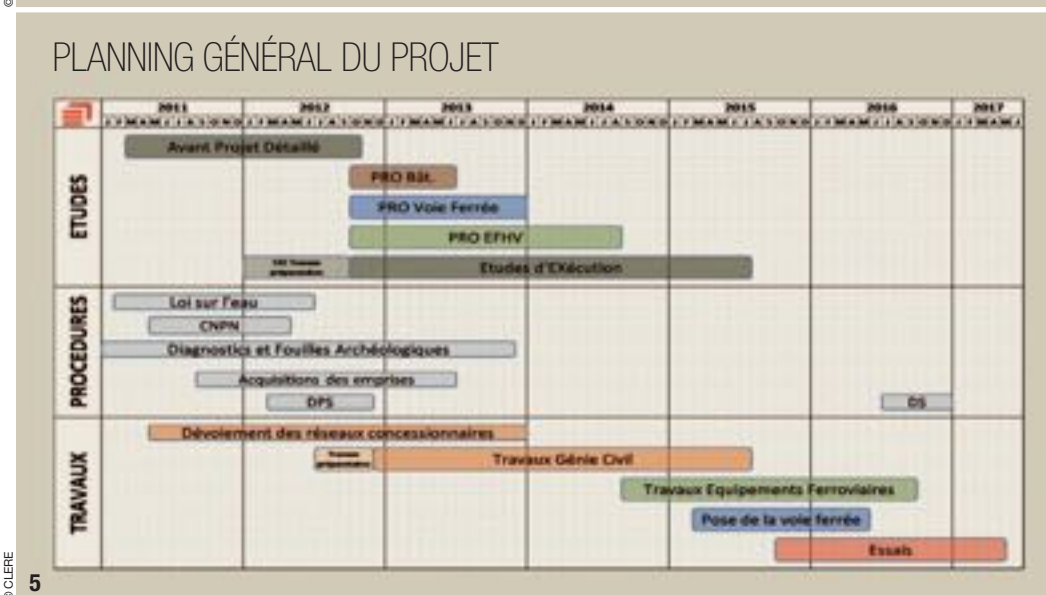
3 © CLERE

ORGANISATION DES TRAVAUX



© CLERE 4

PLANNING GÉNÉRAL DU PROJET



© CLERE 5

de plateformes de stockage situées le long de la ligne. L'alimentation électrique de la LGV BPL en 25 kV est assurée par deux sous-stations dans le périmètre du PPP, l'une à Juigné-sur-Sarthe et l'autre au Pertre et aux deux extrémités est et ouest par des sous-stations existantes dans le périmètre de RFF. Toutes ces sous-

- 4- Organisation des travaux.
- 5- Planning général du projet.
- 4- Work organization.
- 5- General project schedule.

stations seront reliées au Centre Sous Station (CSS) en cours de réalisation par RFF (hors périmètre PPP) La LGV BPL sera équipée en signalisation par de la TVM 300 (système en fonctionnement sur la LGV Atlantique actuelle), de l'ERTMS 2 pour les LGV interopérables et de l'ERTMS 1 pour la partie fret au nord du Mans. Le Poste

de Commande à Distance (PCD) qui permettra l'exploitation la LGV est en cours de réalisation et est hors périmètre PPP. Ces trois systèmes doivent être juxtaposés pour permettre les meilleures performances pour la ligne et constituent une des complexités du projet. En effet, l'exploitation commerciale en ERTMS commence à apparaître en France (la Ligne à Grande Vitesse Perpignan Figueras est exploitée en ERTMS 1 depuis 2012 et le début de l'exploitation de la LGV Est en ERTMS 2 est prévu pour les premiers mois de 2015) mais nulle part on ne trouve une juxtaposition aussi complexe. Concevoir, comme c'est le cas sur BPL, une LGV en même temps qu'on développe un nouveau système de signalisation et les procédures d'exploitation associées, c'est comme écrire un nouveau code de la route en même temps que l'on construirait une autoroute. Ces problèmes complexes nécessitent une collaboration étroite en mode projet avec l'exploitant et le concepteur réalisateur du PCD de la LGV BPL, à savoir RFF qui se trouve être le client pour ce contrat de PPP. □

ABSTRACT

GENERAL DESCRIPTION OF THE BPL HSL PROJECT

MARC LEGRAND, EIFFAGE (ERE) - MICHEL OLEO, EIFFAGE (CLERE)

The contract for the Brittany/Pays-de-la-Loire high-speed rail line project, designed to connect Le Mans with Rennes, was awarded by RFF to the Eiffage group under a public-private partnership agreement covering the financing, design, construction, maintenance and servicing of this new line. The project involves the execution of a double-track high-speed rail transport platform 214 km long, including 32 km of connections to existing lines. This new line, which is scheduled to be placed in service on 15 May 2017, will allow a time saving of around 40 minutes on the HST trip between Paris and Rennes. □

PRESENTACIÓN GENERAL DEL PROYECTO DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD BRETAÑA - PAÍSES DEL LOIRA (LGV BPL)

MARC LEGRAND, EIFFAGE (ERE) - MICHEL OLEO, EIFFAGE (CLERE)

RFF ha confiado al grupo Eiffage el proyecto de la línea ferroviaria de alta velocidad Bretaña-Países del Loira, destinada a comunicar Le Mans con Rennes, en el marco de un contrato de asociación público-privada sobre la financiación, el diseño, la construcción y el mantenimiento de esta nueva línea. El proyecto consiste en la realización de una plataforma ferroviaria de alta velocidad de doble vía de 214 km, de los cuales, 32 km de conexiones hacia las líneas existentes. Esta nueva línea, cuya puesta en servicio está prevista para el 15 de mayo de 2017, permitirá reducir unos 40 minutos la duración del trayecto del tren de alta velocidad entre París y Rennes. □



# LA CONCEPTION D'UNE LGV : UN DÉFI AUTANT TECHNIQUE QU'ORGANISATIONNEL

AUTEURS : IMED BEN FREDJ, DIRECTEUR TECHNIQUE DE CLERE, EIFFAGE - JEAN BERNARD, DIRECTEUR DE LA MAÎTRISE D'ŒUVRE GÉNÉRALE, SETEC TPI - THIBAUT LEPINGLE, DIRECTEUR DE LA MOEP GC SETEC, SETEC INTERNATIONAL - MICHEL POINSIGNON, DIRECTEUR DE LA MOEP GC INGEROP, INGEROP CI

CONCEVOIR UNE LGV DANS LE CADRE D'UN PPP C'EST INTÉGRER DES SOUS-SYSTÈMES COMPLEXES AVEC DES PROCESSUS DE CONCEPTION DIFFÉRENTS QUI N'OBÉISSENT PAS À LA MÊME ÉCHELLE DU TEMPS. LES DONNÉES D'ENTRÉE ÉVOLUENT PENDANT QUE LES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL AVANCENT. MAÎTRISER CETTE CONCEPTION NÉCESSITE UNE INGÉNIERIE CONCORRANTE ORGANISÉE POUR QUE LES INGÉNIEURS DE SPÉCIALITÉS ET DE CULTURES TRÈS DIFFÉRENTES TRAVAILLENT SUR LE MÊME PROJET.



1 © G. ARNAUD

Une infrastructure ferroviaire diffère d'une infrastructure routière par deux éléments fondamentaux :

- Le train est un transport guidé. Un obstacle ne peut être évité qu'en arrêtant le train ;
- Le conducteur de train est aveugle : au-delà de 30 km/h, la distance d'arrêt est supérieure à la distance de visibilité du conducteur.

Ainsi, la sécurité de circulation des trains, celle des personnes transportées, du personnel d'exploitation et de maintenance de la ligne, et celle des tiers, est-elle entièrement assurée par le système ferroviaire.

Le système ferroviaire est constitué d'un ensemble de sous-systèmes :

- La voie et les appareils de voie pour supporter et guider le matériel roulant ;
- La caténaire qui permet l'alimentation du train en 25 kV ;
- La signalisation qui permet au conducteur de train d'avoir toutes les informations nécessaires en cabine et qui assure la sécurité des circulations (espacement des trains et protection vis-à-vis des obstacles) ;
- Les télécommunications fixe et mobile (GSM-R) pour assurer les transmissions des informations

**1- Vue aérienne de la base travaux de Saint-Berthevin.**

**1- Aerial view of the Saint-Berthevin work base.**

- en toute sécurité ;
- La plateforme de génie-civil qui constitue la fondation de la voie, les plateformes annexes nécessaires aux équipements ferroviaires et l'accès à ces plateformes pour la maintenance de la ligne.

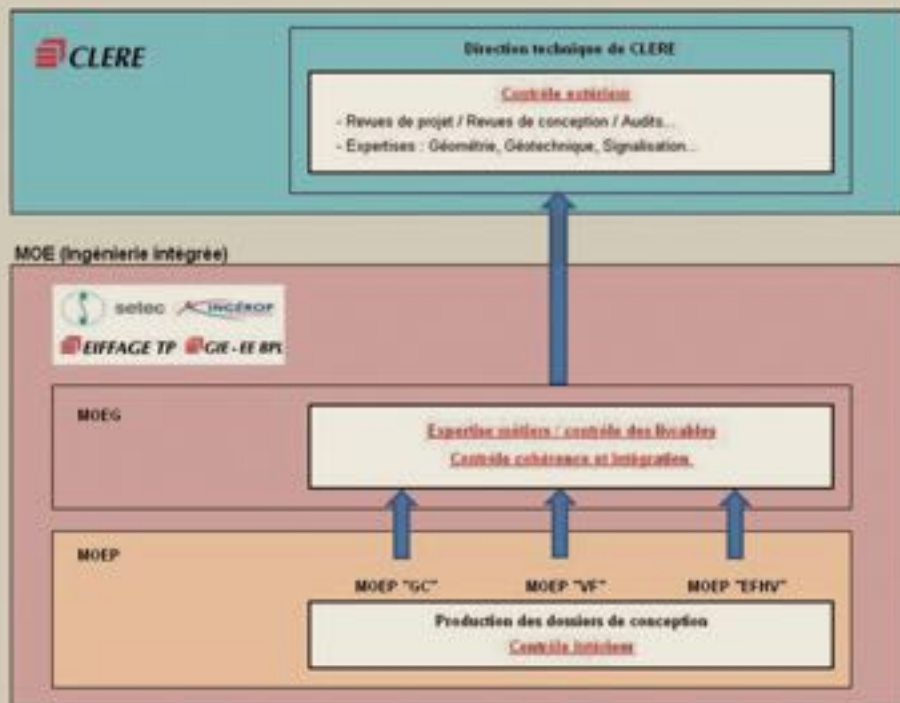
Le ferroviaire nécessite donc le déploiement d'un système complexe extrêmement fiable et la mise en place de règles de conduite sécuritaires et cohérentes sur l'ensemble du réseau.

Le génie-civil, qui est le poste le plus coûteux dans la réalisation d'une LGV, n'est alors qu'au service du système ferroviaire.

En face de cet enjeu sécuritaire, une infrastructure ferroviaire nécessite d'être exploitée au maximum de ses possibilités pour les raisons suivantes :

- L'infrastructure est coûteuse (en investissement et en maintenance). Une heure d'interruption de circu-

## PROCESSUS DE CONTRÔLE DE LA CONCEPTION



© CLERE 2

lation a un coût très important, surtout sur une LGV. Les enjeux de maintenance sont donc primordiaux, afin d'offrir la meilleure disponibilité du système ;

→ L'infrastructure ferroviaire est soumise à concurrence et se doit d'être fiable et disponible, sous peine de perdre en compétitivité.

On ne peut donc pas parler de projet technique de plateforme en conception sans parler d'équipements ferroviaires, de FDMS (Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité et Sécurité) et de gestion des interfaces, donc d'organisation.

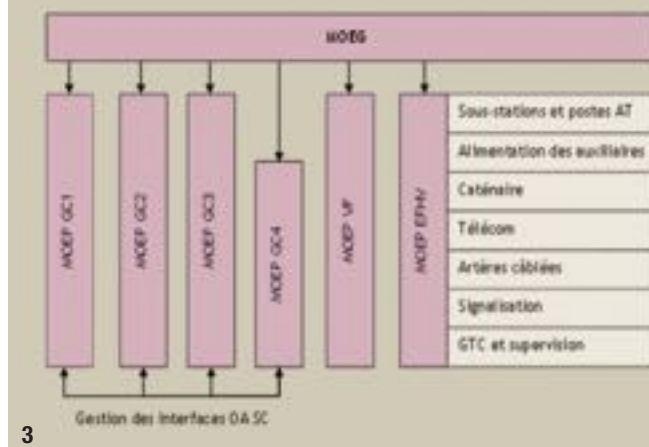
### ORGANISATION DE LA CONCEPTION GESTION DU CONTRAT DE LA MOE

La conception de la LGV BPL a été confiée à un Groupement Momentané d'Entreprise Solidaires (GMES) composé de Setec (mandataire), Ingerop, Eiffage TP et le GIE Eiffage Energie (GIE créé pour le projet BPL au sein d'Eiffage Energie).

La direction technique de CLERE (le GIE CLERE porte la conception et la construction de la LGV BPL au sein d'Eiffage), gère le contrat de MOE et assure les arbitrages nécessaires (figure 2). La direction technique assure par ailleurs le contrôle extérieur de la conception à travers des réunions régulières et des audits ciblés sur certains domaines.

La maîtrise d'œuvre (figure 3) est constituée d'une Maîtrise d'Œuvre Générale (MOEG), basée à Rennes

## ORGANISATION DE LA MOE



© CLERE 3

2- Processus de contrôle de la conception.

3- Organisation de la MOE.

2- Design control process.  
3- Organisation of project management.

avec l'équipe projet, et de plusieurs maîtrises d'œuvre particulières (MOEP) en charge de réalisation des études et de la production des livrables, du visa des plans d'exécution et de la supervision des travaux. Les MOEP travaillent dans leurs locaux et sur le chantier à la demande de la MOEG.

### LA MAÎTRISE D'ŒUVRE GÉNÉRALE : LIEU DU DÉBAT CONCEPTUEL

La MOEG est au cœur de la maîtrise technique du projet (figure 4). Basée à Rennes au sein même de la direction du projet, elle est constituée d'une équipe intégrée qui est issue essentiellement de Setec et d'Ingerop mais aussi d'Eiffage. Ces derniers travaillent en coordination avec les équipes travaux afin de réaliser un projet commun optimisé. La MOEG assure les missions suivantes :

- Pilotage des MOEP et contrôle des livrables : établissement de commandes précises tenant compte des arbitrages projet, gestion en continu de l'évolution des données d'entrée, contrôle continu des quantités, contrôle des livrables, etc. ;
- Gestion des interfaces entre sous-

systèmes : établissements de fiches d'interfaces, suivi de la résolution de chaque interface avec les différentes MOEP, analyse des impacts des modifications d'un sous-système sur les autres ;

- Gestion de la configuration : vérification, à des moments clés du projet, de la cohérence des documents maîtres utilisés par les différents sous-systèmes, puis de la prise en compte des écarts éventuels ;
- Gestion de l'intégration du projet BPL dans le RFN ;
- Pilotage technique des essais d'intégration des sous-systèmes entre eux ;
- Consolidation des études FDMS et du Dossier de Sécurité avant transmission à l'EPSF (Etablissement Public de Sécurité Ferroviaire).

Pour assurer ces missions, il a fallu constituer une équipe d'experts de tous les métiers concernés par une LGV, de coordinateurs de haut niveau, d'ingénieurs polyvalents, d'ingénieurs méthodes et les faire tous travailler ensemble.

Toute l'équipe de la MOEG a été mobilisée dès le premier jour y compris les experts des équipements ferroviaires.

### DES RÈGLES ORGANISATIONNELLES SIMPLES ET LISIBLES

Depuis le démarrage de la conception, l'une des grandes problématiques des grands projets clés en main est la gestion de l'évolution des données d'entrée, liée à la concertation et la production des dossiers administratifs fiables notamment pour le foncier, le dossier loi sur l'eau et le dossier CNPN (Conseil National de la Protection de la Nature). Deux règles organisationnelles ont été adoptées :

1- La MOE produit tous les livrables quelles que soient leurs destinations : dossiers de concertation avec toutes les administrations, dossiers fonciers, dossier loi sur l'eau, dossier CNPN...

2- Tous les arbitrages concernant la définition géométrique du projet passent par la Direction Technique. Ces deux règles permettent à la fois de responsabiliser les mêmes acteurs et surtout de créer des processus simples permettant d'assurer une traçabilité complète des évolutions.

Par ailleurs, la maîtrise de la fiabilité de la géométrie du projet à tous les moments clés nécessite la production de dossiers de livrables géométriques intermédiaires complets.



## LE PROJET TECHNIQUE DE LA LGV

### UNE LIGNE AVEC DE NOMBREUX RACCORDEMENTS

Bien que longue de 182 km, la ligne comprend de nombreux raccordements au réseau ferré national (RFN) existant (figure 5). En effet, la ligne ne comprend pas de gare nouvelle mais les gares existantes du Mans et de Laval sont desservies au moyen de raccordements sur la ligne historique Paris-Rennes à partir de la ligne nouvelle :

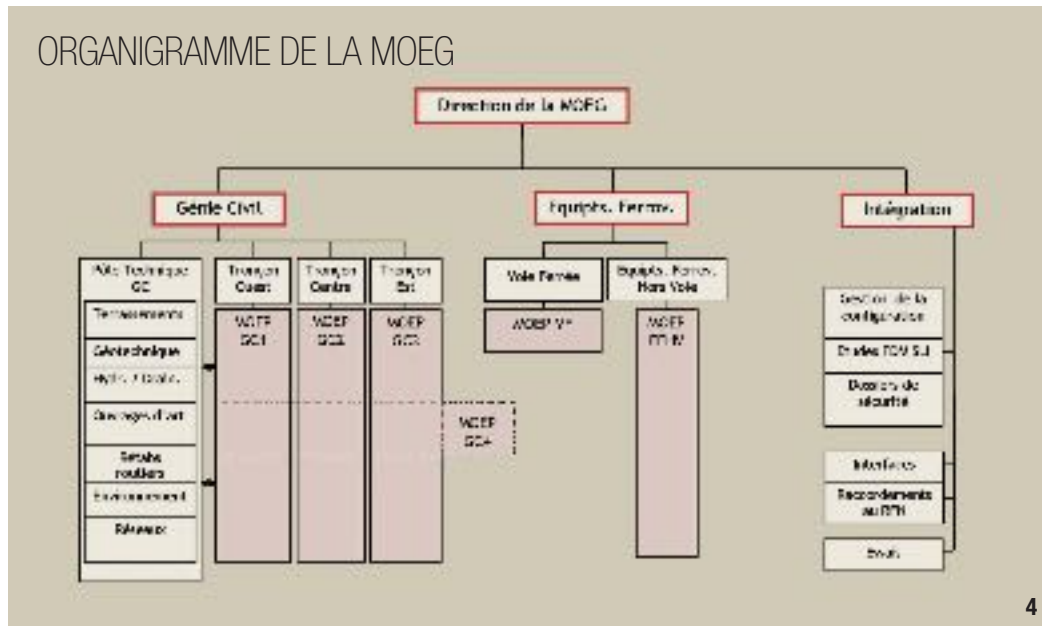
→ La gare du Mans est desservie, côté Paris, par le raccordement existant de Connerré (à l'extrémité de la LGV Atlantique Paris-Le Mans) qui est à aménager et, côté Rennes, par le raccordement de la Millese, à construire ;

→ La gare de Laval est desservie par 2 raccordements à construire, Laval Est côté Paris, et Laval Ouest côté Rennes.

Par ailleurs, le raccordement de Sablé-sur-Sarthe relie la ligne nouvelle à la ligne existante Paris-Nantes.

Enfin, la possibilité pour les trains de fret d'emprunter la ligne nouvelle sur une longueur d'environ 23 km pour contourner l'agglomération du Mans est assurée par les raccordements fret de cette ligne à la ligne existante Paris-Le Mans-Rennes, à Connerré et à la Millese.

Si on rajoute aux 6 raccordements au RFN listés ci-avant les jonctions de Rennes et de Connerré aux extrémités de la ligne nouvelle, ce sont 8 raccordements qui sont à concevoir et à réaliser et qui constituent des points d'interfaces particuliers entre les périmètres ERE et RFF, périmètres dont les frontières peuvent varier selon les métiers concernés (tracé, génie civil, voie ferrée, équipements ferroviaires, essais).



### LA PLATEFORME FERROVIAIRE

La géométrie de l'axe de la ligne a été déterminée, par application du Référentiel Technique, sur la base des vitesses de conception indiquées dans le Schéma des Équipements Ferroviaires et correspondant à différents paliers, de 160 km/h à 350 km/h. En effet, bien que la ligne soit circulée à 320 km/h, son tracé a été conçu pour une vitesse de 350 km/h. Sur les 182 km de ligne, 170 km peuvent être circulés à la vitesse de 320 km/h.

Pour donner une idée de la rigidité du tracé en plan d'une LGV, la LGV BPL se décompose en 40 % d'éléments rectilignes, 13 % de clothoïdes et 47 % de courbes circulaires. Sur une dizaine de km, la ligne est accolée à l'autoroute A81 dans le contournement Nord de Laval, et la juxtaposition au plus près de ces deux infrastructures linéaires, pour minimiser les délaissés, illustre la rigidité géométrique d'une LGV par rapport à celle d'une autoroute.

Sur le linéaire où la ligne est circulée à la vitesse de 320 km/h et par un trafic voyageurs uniquement, l'entraxe des voies est de 4,50 m et la plateforme

### 4- Organigramme de la MOEG.

### 5- LGV BPL avec ses huit raccordements.

### 4- Organisation chart of general project management.

### 5- BPL HSL with its eight connections.

ferroviaire a une largeur classique de 13,90 m (figure 6).

Sur le linéaire de 23 km du contournement Nord du Mans, où la ligne est conçue pour du trafic mixte (trains de voyageurs à 320 km/h et trains de fret à 100 km/h) l'entraxe des voies est porté à 4,80 m ce qui élargit la plateforme à 14,20 m. Celle-ci peut également se trouver élargie de 1 m de chaque côté pour loger des caniveaux béton de recueil des eaux de ruissellement sur la plateforme en cas de pollution accidentelle consécutive à un incident ou accident impliquant un wagon trans-

portant des matières dangereuses. Sur la partie Ouest de la ligne, la pratique de référence a été retenue, qui consiste à asseoir la voie ferrée sur une sous-couche ferroviaire de 0,20 m d'épaisseur en matériaux granulaires reposant sur une couche de forme de 0,30 m, également en matériaux granulaires. Mais sur les 105 km de la partie Est de la ligne, c'est une solution de sous-couche ferroviaire en grave bitume, s'inspirant de l'expérimentation faite sur un tronçon de 3 km de la LGV Est européenne Phase 1, qui a été retenue. Elle fait l'objet d'un article spécifique dans la présente revue.

### LES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL

Pour ce qui est de la description des ouvrages de génie civil de la LGV BPL, on renvoie le lecteur aux deux articles de la présente revue qui traitent spécifiquement, l'un des terrassements, l'autre des ouvrages d'art.

Une particularité des infrastructures linéaires que sont les LGV est la multiplicité des plateformes à réaliser tout le long de la ligne et qui sont soit accolées à la plateforme ferroviaire soit implan-

## LGV BPL AVEC SES HUIT RACCORDEMENTS



## COUPE TRANSVERSALE FONCTIONNELLE EN SECTION COURANTE

6  
© CLERE**6- Coupe transversale fonctionnelle en section courante.****6- Functional cross section on standard section.**

tées à proximité immédiate de celle-ci. On liste ci-après les principales natures de plateforme rencontrées avec indication de leur nombre pour le projet de LGV BPL :

- Plateformes pour équipements ferroviaires spécifiques :
  - Pour l'alimentation électrique de la ligne : 2 sous-stations, 1 poste d'injection et 14 postes d'auto-transformation,
  - Pour la caténaire : 57 interrupteurs,
  - Pour les télécommunications : 25 sites GSM-R,
  - Pour la signalisation : 18 postes mais également une vingtaine de détecteurs ;
- 19 plateformes d'enraillement d'engins de maintenance de type rail-route ;
- 22 plateformes constituant des aires de montage des appareils de voie, pour les opérations de renouvellement de la voie ;
- De nombreux accès (477) à la plateforme ferroviaire qu'ils soient routiers ou piétons avec cheminement depuis une voie routière ;
- Enfin, bien qu'il s'agisse de plateformes provisoires démontées à la fin des travaux de pose de la voie, 25 aires de stockage du ballast utilisées pour le pré-ballastage de la voie, c'est-à-dire la mise en place, par des techniques routières, d'une première couche de ballast d'une épaisseur de 20 cm.

L'implantation de ces plateformes est conditionnée par des fonctionnalités du système ferroviaire mais doit également répondre à des obligations d'accès depuis l'extérieur de l'emprise ferroviaire pour assurer la maintenance des équipements concernés. Ces accès sont adaptés au matériel utilisé pour cette maintenance (VL ou PL). Il en résulte la nécessité de créer, pour les

besoins du mainteneur, des voiries latérales partant d'une voirie structurante, longeant la ligne et desservant la plateforme.

La desserte des plateformes pour équipements ferroviaires spécifiques permet d'illustrer l'intérêt d'un contrôle de la configuration dans le cas d'une démarche d'ingénierie concourante telle qu'elle a été rendue nécessaire pour le respect des plannings de conception et de construction de la LGV BPL.

En effet, alors que la conception du génie civil a été figée à l'automne 2012, la conception des équipements ferroviaires s'est poursuivie jusqu'à l'été 2014. Or toute modification dans l'implantation d'un équipement ferroviaire nécessitant une plateforme spécifique impliquait la reprise de la conception (voire des plans d'exécution) de la plateforme associée et de la voirie latérale assurant sa desserte. Le contrôle de configuration, effectué par la Maîtrise d'Œuvre Générale, a consisté à véri-

fier à intervalles réguliers que tous les acteurs de la conception et de la construction du projet BPL travaillaient sur le même projet et à piloter la correction des écarts éventuels.

**LES BASES TRAVAUX ET BASES DE MAINTENANCE**

La pose de la voie et le déroulage de la caténaire se font au moyen de trains de travaux constitués sur des bases travaux avant d'être envoyés en ligne. De plus, une part importante des matériels de construction de la voie ferrée (rails, ballast, appareils de voie...) est livrée par train sur les bases travaux. Ces bases travaux sont ainsi reliées par voie ferrée au réseau ferré national d'une part et à la ligne nouvelle à construire d'autre part.

L'étendue du projet BPL a conduit à organiser la construction de la ligne depuis 2 bases travaux, l'une à côté de Laval (figure 1) et l'autre à Sablé-

sur-Sarthe. Chaque base travaux a une superficie de 25 ha et elle est constituée d'une plateforme horizontale comportant de nombreux VRD pour recevoir une gare de triage et des aires de stockage.

Une fois la LGV construite, les 2 bases travaux seront démontées sauf quelques voies ferrées qui seront intégrées dans une nouvelle base utilisée pour la maintenance de la ligne. □

**LES PRINCIPALES QUANTITÉS****182 km de ligne nouvelle à 2 voies****8 raccordements au Réseau Ferré National****380 plateformes****500 accès à la plateforme****LES PRINCIPAUX INTERVENANTS****LE CONCÉDANT : RFF****TITULAIRE DU CONTRAT DE PARTENARIAT : ERE (Eiffage Rail Express)****GROUPEMENT CONSTRUCTEUR : CLERE (Construction de la Ligne Eiffage Rail Express)****MAÎTRE D'ŒUVRE : Setec - Ingerop****ABSTRACT****DESIGN OF AN HSL: BOTH A TECHNICAL AND ORGANISATIONAL CHALLENGE**

I. BEN FREDJ, EIFFAGE - J. BERNARD, SETEC TPI - T. LEPINGLE, SETEC - M. POINSIGNON, INGEROP

The contract for overall design of the Brittany/Pays-de-la-Loire High-Speed Rail Line project was awarded to a consortium formed of engineering offices (Setec and Ingerop) and companies of the Eiffage group (Eiffage TP and Eiffage Energie). Project management was organised with specific project managers, each specialised in their trade and in charge of producing the design documents, plus a general project manager to supervise them. The general project management structure, which combines expertise from the engineering offices and Eiffage group, is a venue for conceptual debate in order to achieve an optimised joint project. □

**EL DISEÑO DE UNA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD: UN RETO TANTO TÉCNICO COMO ORGANIZATIVO**

I. BEN FREDJ, EIFFAGE - J. BERNARD, SETEC TPI - T. LEPINGLE, SETEC - M. POINSIGNON, INGEROP

El diseño del conjunto del proyecto de la línea de alta velocidad Bretaña-Paises del Loira se ha confiado a una agrupación formada por oficinas de proyectos (Setec e Ingerop) y empresas del grupo Eiffage (Eiffage TP y Eiffage Energie). La dirección de obra se ha estructurado en direcciones de obra particulares, cada una de ellas especializada en una actividad y encargadas de la producción de los documentos de diseño, más una dirección de obra general que las gestiona. La dirección de obra general, que combina las competencias procedentes de las oficinas de proyectos y del grupo Eiffage, es el lugar del debate conceptual que tiene por objeto realizar un proyecto común optimizado. □





1  
© G. ARNAUD

# LG V BPL - LES TERRASSEMENTS OUVRENT LA VOIE

AUTEURS : RACHEL TERMINAUX-ROSSA, DIRECTRICE TECHNIQUE ADJOINTE GC, CLERE, EIFFAGE TP - OLIVIER PRINET, ADJOINT DIRECTION TERRASSEMENTS, ST1, EIFFAGE TP - PATRICE CHARDARD, DIRECTEUR TECHNIQUE TERRASSEMENTS, ST1, EIFFAGE TP

**LE TRACÉ DE LA LGV BPL TRAVERSE DES TERRAINS QUI REPRÉSENTENT PLUS DE 500 MILLIONS D'ANNÉES D'HISTOIRE GÉOLOGIQUE. DES SABLES DU CÉNOMANIEN JUSQU'AUX SCHISTES DU BRIOVÉRIEN, TOUS LES OUVRAGES EN TERRE INTÈGRENT LES CARACTÉRISTIQUES DES FORMATIONS TRAVERSÉES POUR UNE VALORISATION MAXIMALE DES MATÉRIAUX EN REMBLAI ET UNE OPTIMISATION DES DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES, PERMETTANT D'OUVRIRE LA VOIE VERS L'OUEST.**

## LES TERRASSEMENTS EN PHASE DE CONCEPTION CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Les 182 km de la LGV BPL relie la bordure occidentale du Bassin Parisien au Massif Centre Armoricaïn.

Le projet traverse successivement trois grandes unités géomorphologiques qui sont, d'est en ouest (figure 2) :

- **Du PK 0 au PK 67** : les terrains sédimentaires de l'auréole occidentale du Bassin Parisien, dont les plaines sont constituées par des terrains sablo-argileux du Cénomanién, et les plateaux formés par des terrains rocheux du Jurassique (calcaires, calcaires marneux, marnes).
- **Du PK 67 au PK 122** : les ter-

rains paléozoïques hercyniens du Synclinorium de Laval, orientés NW-SE selon la direction principale du Massif Armoricaïn. La lithologie est à dominante schisto-gréseuse, mais on recoupe également des conglomérats et des calcaires. Ces terrains, plus ou moins altérés, peuvent être recouverts par des sables et graviers du Pliocène, et des limons de plateau.

- **Du PK 122 au PK 182** : les terrains du Précambrien et du Paléozoïque du Massif Centre Armoricaïn constitués essentiellement par les schistes du Briovérién, localement recoupés par des intrusions granitiques.

## 1 - Terrasse-ment LGV BPL.

1 - BPL HSL earthworks.

## CAMPAGNES DE RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES COMPLÉMENTAIRES

Plusieurs campagnes de reconnaissances géotechniques avaient été menées antérieurement à la phase d'Avant-Projet Détaillé (APD), de 1986 à 2010.

L'ensemble des données issues de ces précédentes phases d'études a été

analysé afin de définir les programmes des campagnes de reconnaissances géotechniques complémentaires, exécutés dans le cadre des études APD. Ils ont été découpés en trois marchés. Ces marchés, qui concernaient à la fois la conception des terrassements et des ouvrages d'art, ont été exécutés de la mi-mai à fin décembre 2011. Une dernière campagne, menée de février à mi-mai 2012, a permis de compléter les entrants nécessaires aux études de conception.

Au total, pour les études d'APD, 1 850 sondages ont été réalisés au titre des investigations complémentaires. 445 forages ont été équipés de piézomètres.

**CONCEPTION DES TERRASSEMENTS**

À partir du projet de référence issu de l'offre, durant 14 mois, les équipes d'Eiffage Travaux Publics ont travaillé conjointement avec le groupement de maîtrise d'œuvre pour concevoir un projet de terrassements optimisé, intégrant les méthodes travaux et les contraintes d'exécution.

Au cours d'un processus itératif, intégrant progressivement les résultats des investigations complémentaires, ainsi que les entrants et contraintes issus des autres domaines (concertations, emprises, topographie, environnement, hydraulique, ...), les équipes de conception ont travaillé sur les principaux axes d'études suivants :

**2- Situation géographique des grands ensembles géologiques.**

**3- Étude de la valorisation des granites du déblai D1337 - Le Pertre.**

**2- Geographic location of major geological units.**

**3- Study of the exploitation of excavation granites from D1337 - Le Pertre.**

→ Stratégie Terrassements :

- Optimisation du bilan des terrassements, mouvements des terres, besoins en dépôts,
- Réutilisation et valorisation des matériaux du site,
- Limitation du recours aux fournitures extérieures, ...

→ Dispositions constructives:

- Franchissement des zones compressibles,
- Drainage des déblais humides, stabilité des talus,
- Sols gonflants,
- Franchissement des plans d'eau,
- Recherche et traitement des cavités, ...

Le calage du projet a porté sur la mise en cohérence des stratégies

terrassements avec le contexte et les spécificités de chaque TOARC (lot de travaux Terrassements-Ouvrages d'Art-Rétablissements de Communication), particulièrement en ce qui concerne la définition des besoins et ressources en matériaux à usages spécifiques : matériaux de blocs techniques d'ouvrages, de zones humides, inondables, matériaux drainants, structures d'assises, ... La valorisation des matériaux du site a été poussée au maximum, aussi bien pour les matériaux rocheux que pour les sols meubles traités, et le recours aux fournitures extérieures limité aux nécessités et impératifs techniques ; ainsi, pour chaque catégorie de matériaux à usage spécifique, une distinction des volumes a été opérée, entre les cas où la mise en œuvre de matériaux granulaires s'imposait et les cas où le recours aux matériaux traités était possible.

Le choix a été fait selon les opportunités et le contexte de chaque TOARC, et, au final, près des deux tiers des matériaux à usage spécifique correspondent à des matériaux valorisés du site, le tiers restant provenant de carrières extérieures. Enfin, l'ensemble des dispositions constructives a bien évidemment été défini dans le cadre des études APD, tout en permettant l'ajustement de la disposition en phase travaux.

On peut noter, dans ce registre, la valorisation du déblai granitique D1337 du TOARC B qui aura fourni 580 000 m<sup>3</sup> de matériaux élaborés : matériaux ZI/ZH, drainants, GNT pour blocs techniques, couches de forme routières et ferroviaires, sous-couche ferroviaire (figure 3).

**LES TRAVAUX**

**ORGANISATION GÉNÉRALE DES TRAVAUX - PLATEFORME GÉNIE CIVIL ST1**

Les travaux de la plateforme ferroviaire ont été confiés par le Concepteur Constructeur CLERE à l'entité ST1, groupement momentané d'entreprises conjointes, composé des sociétés d'Eiffage Travaux Publics.

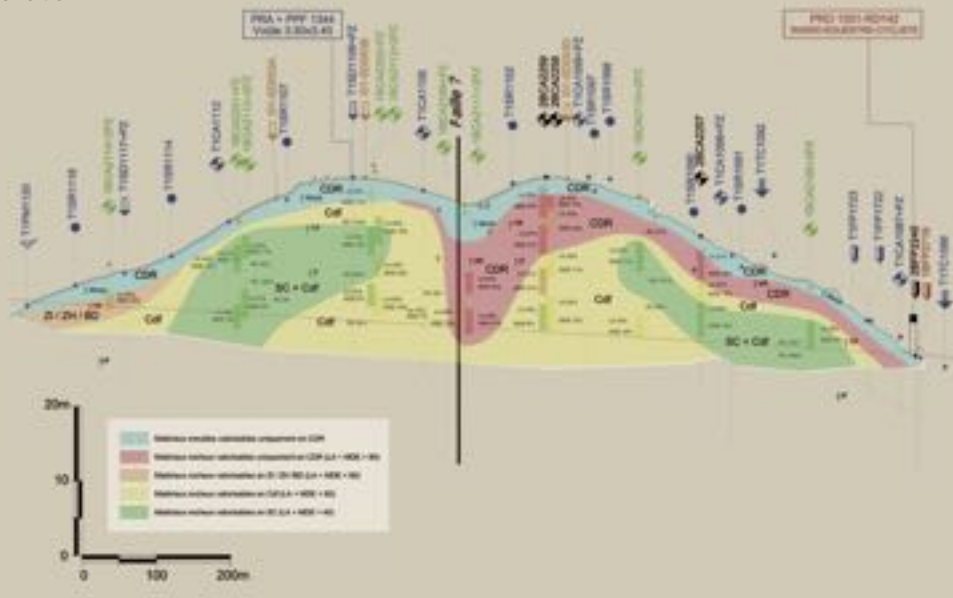
Ces travaux ont été découpés en 7 TOARC (Terrassement/Ouvrages d'Art/Rétablissements de communication), représentant chacun 25 à 30 km de plateforme. Les TOARC sont numérotés de A à G, d'ouest en est (figure 4). Chaque TOARC est placé sous la responsabilité d'un directeur, assisté de 4 directeurs de lot représentant les 4 métiers : Terrassements - Ouvrages d'Art - Chaussées - Déviations de réseaux.

SITUATION GÉOGRAPHIQUE DES GRANDS ENSEMBLES GÉOLOGIQUES



© EIFFAGE TP 2

ÉTUDE DE LA VALORISATION DES GRANITES DU DÉBLAI D1337 Le Pertre



© EIFFAGE TP 3



## 12 installations provisoires : 5 principales 7 secondaires



4

## TABLEAU RÉCAPITULATIF DES INTERVENANTS TERRASSEMENTS sur les différents TOARC

TOARC	Terrassement	Longueur LGV	Longueur Raccordement	Base travaux	Cubatures Déblais
A	Sous Traitant société FISCOM - CHARNIER - ROGER MARTIN	30,8 km	-		3,8 millions m <sup>3</sup>
B	EFFIAGE TP - FOUGEROLLE BALLOT Terrassements	28,2 km	7,2 km	1	4,5 millions m <sup>3</sup>
C	TF TINTI - ROLAND	15,6 km	-		2,0 millions m <sup>3</sup>
D	PONCEZIERNE d'Entreprises - BUESA	25 km	6,5 km		5,0 millions m <sup>3</sup>
E	PERFI + alliage FOUGEROLLE BALLOT Terrassements	23,3 km	20,8 km	1	3,1 millions m <sup>3</sup>
F	EFFIAGE TP - FOUGEROLLE BALLOT Terrassements	27,9 km	7,5 km		5,1 millions m <sup>3</sup>
G	EFFIAGE TP - FOUGEROLLE BALLOT Terrassements	24,1 km	2,5 km		4,0 millions m <sup>3</sup>

5

© EFFIAGE TP

4- Schéma général BPL avec allotissement en 7 TOARC.

5- Tableau récapitulatif des intervenants terrassements sur les différents TOARC.

6- Rescindement de la Morinière.

4- BPL general diagram with breakdown into 7 TOARC project phases.

5- Summary table of earthworks contractors on the various TOARC project phases.

6- Bank redevelopment works on the Morinière.

La cellule ST1 a pour rôle de diriger l'ensemble des travaux de la plateforme, et d'assurer la cohérence de suivi des 7 TOARC. Elle contrôle l'ensemble des travaux tout en laissant une forte autonomie et initiative au TOARC, permettant ainsi à chaque directeur d'assumer pleinement ses responsabilités dans son périmètre. ST1 est une structure légère de 15 personnes à laquelle sont rattachés les 7 directeurs de TOARC. La cellule ST1 assure, outre la direction des travaux et la planification générale, les missions de reporting, d'interfaces avec le constructeur et la gestion des contrats importants de fournitures et de sous-traitance.

### ORGANISATION DES TERRASSEMENTS

Les travaux de terrassements ont été confiés aux différentes entités terrassements d'Eiffage et complétés avec des sous-traitants (figure 5).

Le chantier est organisé à partir de 5 installations principales et 7 installations secondaires pérennes, et de multiples installations temporaires, essentiellement pour les ouvrages d'art. Les objectifs des plannings terrasse-

ments sont liés à la stratégie retenue et aux contraintes des travaux de pose de voies. Le scénario était un enchaînement de livraison des TOARC suivant les contraintes des Bases Travaux (BTx) et la complexité du TOARC C (contournement Nord de Laval avec une grande densité d'ouvrages d'art non courants). La programmation de livraison de la plateforme est :

→ **Fin été 2014** : TOARC E Ouest puis D à partir de la BTx de Sablé,

→ **Automne 2014** : TOARC B puis A à partir de la BTx de St-Berthevin,

→ **Hiver 2015** : TOARC E Est puis F,

→ **Printemps 2015** : TOARC G puis C. Compte tenu des risques travaux inhérents à ce type de chantier, les stratégies suivantes ont été adoptées :

→ Anticipation des travaux préparatoires de 6 mois (juillet 2012 au lieu de janvier 2013) ; ceci n'étant possible que grâce à une accélération des libérations foncières, des études projets et des autorisations environnementales ;

→ Les plannings de livraison des TOARC B et A devaient permettre



6

© G. ARNAUD

## COURBE DE SUIVI DES VOLUMES DE DÉBLAIS



de suppléer aux livraisons des TOARC D et E si ces derniers rencontraient des difficultés.

→ Réalisation des sous-couches en Grave Bitume en lieu et place de sous-couche granulaire sur les TOARC D, E, F, G, permettant de mieux assumer les risques hivernaux pour les TOARC F et G.

### TRAVAUX PRÉPARATOIRES

Les travaux préparatoires ont démarré dès juillet 2012 sur l'ensemble du tracé et ce en fonction des libérations foncières. Ces travaux anticipés avaient comme objectif de préparer le chantier pour permettre une production en pleine cadence des terrassements à partir du milieu du printemps 2013. Ils consistaient principalement en travaux de libération des emprises, travaux environnementaux, points durs vis-à-vis du mouvement des terres et des travaux d'ouvrages d'art :

→ Pour l'assainissement provisoire de chantier, plus de 850 bassins

de décantation ont été créés et entretenus, avec environ 450 km de fossés provisoires permettant la gestion et la décantation des eaux du chantier ;

→ Dérivation ou franchissement provisoire des 64 points d'impact de cours d'eau sur le chantier (figure 6) ;

→ Création de 102 mares de compensation immédiate ;

→ Travaux de protection des espèces dont environ 60 déplacements de batraciens, 82 km de bâches provisoires anti-batraciens, mise en exclos de plus de 87 sites boisés avec insectes saproxyliques ;

→ Accès pistes et fouilles pour une partie des 240 ouvrages d'art ;

→ 49 déviations provisoires de voiries sur les 157 rétablissements de voirie prévus au projet ;

→ Préparation des zones compressibles, purges, mise en place de drains verticaux et mise en place des remblais de surcharge.

### TERRASSEMENTS GRANDE MASSE

Après un démarrage très pluvieux (de septembre 2012 à juin 2013, cumul de précipitations parmi les pires de ces 30 dernières années), le chantier à fin juin 2013 n'est qu'à 29% d'avancement en volume de déblais avec un déficit d'environ 2,5 millions de m<sup>3</sup> vis-à-vis des objectifs de production. La mobilisation anticipée, le passage en poste et la météo favorable de l'été et l'automne 2013 ont permis de rattraper ce retard et d'atteindre l'objectif prévu à fin décembre 2013, soit 18,9 millions m<sup>3</sup> de déblais exécutés, représentant 73% du chantier (figure 7).

Les objectifs ont été tenus puisque en cette fin d'automne 2014, les plateformes ferroviaires des TOARC E Ouest, D et B ont été livrées. Les plateformes du TOARC A sont en cours de livraison pour la fin d'année avec anticipée la livraison des TOARC E-Est et du TOARC C.

### MOYENS EN MATÉRIELS

La mobilisation du matériel sur BPL a démarré dès juillet 2012, pour atteindre un total de 300 machines en fin 2012 pour les travaux préparatoires. La mobilisation des échelons grande masse (figure 8) et accompagnement a continué progressivement pour atteindre son niveau de pointe en été 2013, avec 840 machines.

Cette mobilisation s'est faite (figure 9) :

- En établissant un programme ambitieux d'achat de matériel en augmentation et/ou en renouvellement du parc Eiffage (130 machines) ;
- En optimisant l'utilisation du parc matériel Eiffage : 325 machines mobilisées (40% des besoins), avec le complément en sous-traitance (20%) et en location (40%) ;
- Avec, en période de pointe, 25 ateliers de production grande masse :
  - 2 échelons de pelle 110 t (9100 Liebherr + tombereaux 773),
  - 9 échelons de pelle 90 t,
  - 12 échelons de pelle 60/65 t,
  - 2 ateliers de motoscrapers ;
- Avec le passage en poste de 8 échelons de grosse production en période estivale ;
- Avec, en pointe, environ 25 ateliers de traitement de sols.

### MOYENS EN PERSONNEL

Pour assumer cette montée en puissance de production, il a été nécessaire de former et embaucher localement du personnel de conduite d'engins de chantier. Les formations ont démarré dès l'été 2012, sur deux sites du chantier BPL. Plus de 400 personnes ont été formées, dont 280 avec Pôle Emploi, représentant 80 000 heures de formations. Plus de 550 personnes ont été embauchées localement pour les besoins du terrassement, avec un taux d'insertion à fin d'été 2014 de 19% (figure 10).

### SUJETS TECHNIQUES

#### SOLS COMPRESSIBLES

Un chantier de terrassements est souvent confronté aux mauvaises caractéristiques des sols en assise de remblais. Il est alors nécessaire de bien caractériser les sols supports afin de définir les dispositions constructives adaptées aux délais de réalisation du chantier.

Le processus est le plus souvent itératif : sondages de reconnaissance, définition du modèle géologique et géotechnique, nouvelles reconnaissances pour préciser les limites du modèle et les caractéristiques du matériau. ▶

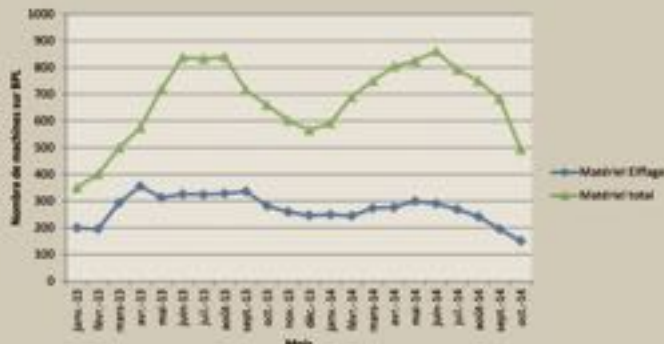
7- Courbe de suivi des volumes de déblais.  
8- Pelle de production - Liebherr 9100.

7- Excavation volume tracking curve.  
8- Liebherr 9100 production shovel.



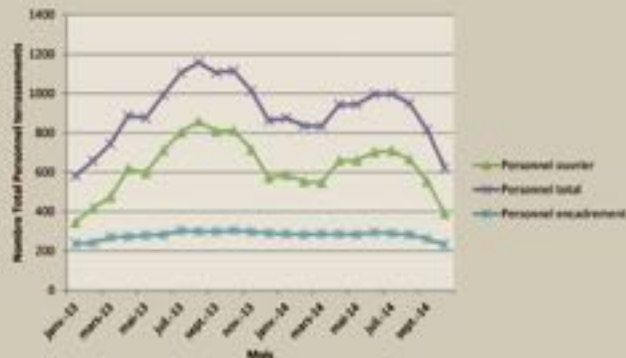


**COURBE ÉVOLUTION MENSUELLE  
du nombre de machines**



9

**COURBE ÉVOLUTION MENSUELLE  
du personnel de terrassements**



10

La LGV BPL est concernée par 94 assises de remblais compressibles, représentant plus de 22 km de tracé, pour des tassements atteignant ponctuellement 2 m d'amplitude.

La conception prend en compte des hypothèses du projet, en termes de dispositions constructives et de délais de réalisation, pour assurer ou garantir la faisabilité. Cependant l'acquisition tardive des terrains, les difficultés de visa des études, les interfaces avec les ouvrages traversant ainsi que les aléas de terrain peuvent rendre les délais de consolidation des sols sous remblais incompatibles avec le projet.

Dès la phase des travaux préparatoires, les études d'exécution géotechniques définissent une méthode volontariste pour le calcul de l'amplitude de tassement et pour la perméabilité des sols qui conditionne le délai de consolidation. Pour garantir et maîtriser les paramètres liés à la compressibilité des sols, il est décidé de réaliser trois remblais d'essai et de mettre en place une procédure spécifique de suivi qui s'appuie sur une instrumentation importante des remblais.

La mission G3 « suivi géotechnique d'exécution » au sens de la norme P94-500 prend tout son sens :

- Les dispositions constructives étudiées sont systématiquement comparées à la conception ;
- Les conditions de sols sont vérifiées par sondages ou lors des purges ;
- Les mesures d'instrumentation confirment pas à pas les hypothèses ;
- Les remblais avec des conditions d'assise similaires, sont comparés entre eux.

Le processus complet a consisté à considérer dès le début des travaux des hypothèses de tassement optimistes, à vérifier les tassements avec des remblais d'essai pour valider ces nouvelles

hypothèses et à encadrer le suivi des remblais compressibles de façon à identifier les éventuels écarts au cours de la première année de terrassements. Cela a permis de simplifier et limiter les dispositions constructives de nombreux remblais : purges partielles ou totales, simple mise en œuvre d'une surcharge ferroviaire (figure 11) et ponctuellement la mise en œuvre de drains verticaux ou d'inclusions rigides.

**CAVITÉS**

Sur le projet BPL, l'aléa « cavité naturelle » est lié à la présence des couches calcaires.

Les calcaires du Jurassique sont essentiellement altérés et fissurés et n'ont pas montré de cavernement franc. Ils affleurent ou sont proches de la surface entre les Pk 42 et 62.

Les dépôts postérieurs ont été mis en place sur une paléo-topographie accidentée.

Ils colmatent le paléo-relief karstique ou altéré ainsi que la plupart des conduits karstiques associés.

Les calcaires de l'ère primaire n'affleurent pas sur le tracé : Le recouvrement est constitué par les marno-calcaires du Toarcien, des argiles à silex ou des sables du Pliocène du Pk 62 au Pk 66



11

**9- Courbe évolution mensuelle du nombre de machines.**

**10- Courbe évolution mensuelle du personnel de terrassements.**

**11- Chargement du remblai R0574 sur le TOARC E.**

**9- Curve of monthly changes in the number of machines.**

**10- Curve of monthly changes in earthworks personnel.**

**11- Loading R0574 backfill in TOARC project phase E.**

et du Pk 108 au Pk 109, ainsi que sur le raccordement de Sablé. Les sondages de reconnaissance ont confirmé la karstification de ces calcaires primaires, mais avec, le plus souvent, des cavités remplies.

L'aléa karstique a été défini sur la base des critères suivants :

- Aptitude des formations à la karstification ;
- Présence de formes karstiques identifiées en surface ;
- Modalités supposées des écoulements souterrains ;
- Indices de cavités vides ou colmatées lors des reconnaissances géotechniques.

L'aléa « cavité anthropique » est lié à l'activité minière. L'ensemble des schistes de Laval, Pk 67 à 108, et une partie du contournement de Laval,

FIGURE 12 : GRILLE SYNTHÉTIQUE D'ÉVALUATION DE L'ALÉA CAVITÉ

Degré d'aléa	Aléa cavité karstique	Aléa cavité minière
Absence	Terrains non karstiques (calcaires marneux, marnes, argiles, sables et graviers, schistes et grès).	Terrains géologiquement incompatibles avec la présence de gisements potentiellement exploitables.
Faible	Terrain peu karstique, aquifère fissuré, terrain karstique sous couverture peu soutirable.	Terrains géologiquement compatibles avec la présence potentielle de gisements, mais absence d'indices.
Fort	Terrain karstique sous couverture soutirable, formes karstiques modestes.	Présence d'indices d'exploitations minières souterraines à proximité du projet.
Très fort	Terrains karstiques, formes karstiques fréquentes et développées.	Présence d'indices d'exploitations minières souterraines à faible profondeur au droit du projet.



13

© G. LEROUX - INRAP



14

© V. GALLIEN - INRAP

peut avoir fait l'objet de travaux miniers, notamment pour l'extraction de houille. Sept concessions minières ont été identifiées, mais leur extension et leur géométrie ne sont pas connues.

L'aléa minier a été analysé avec :

→ Les données bibliographiques, administratives et historiques ;

→ Les indices de terrains ;

→ Les données géologiques ;

→ Les indices lors des reconnaissances géotechniques.

Selon le type d'anomalie, karstique ou minière, le tracé a donc pu être décomposé en zones d'aléa absent, faible, fort et très fort (figure 12).

**13- Mines de fer - traces des puits et galeries.**

**14- Mines de fer - début de fontis sur galeries.**

**13- Iron ore mines - traces of shafts and galleries.**

**14- Iron ore mines - incipient subsidence cavity on galleries.**

plus profond, l'extraction s'effectue par puits et galeries souterraines, jusqu'à 4 ou 5 m de profondeur, qui sont remblayés au fur et à mesure de l'exploitation. Certains déblais sont criblés de zones d'extraction (figure 13) identifiées par le matériau de remblaiement, de couleur ou de stratification différente de l'encaissant. Le remblaiement manuel de l'époque a laissé quelques voûtes ou extrémités de galerie mal remblayées (figure 14) ; lors des travaux, quelques fontis de faible ampleur ont été observés.

Les méthodes traditionnelles de reconnaissance de cavités se sont trouvées peu efficaces pour détecter ce type d'anomalie et il a été fait appel aux services de l'Inrap qui a pu informer et conseiller le chargé cavité du TOARC F : Zones d'extraction, cotes minimales des galeries, observations sur sondages en fond de déblai. Au final, seules deux zones en déblai de faible hauteur ont dû faire l'objet de purges préventives au niveau de la PST. □

Le secteur de La Milesse, du Pk 24 au Pk 27, est particulier : En effet, parmi les 40 fouilles archéologiques préventives, 8 sites au nord du Mans témoignent d'une activité métallurgique vers 500 av. J.-C. Le minerai de fer se présente en amas ou en plaquettes au sein des sables et des argiles du Céno-manien. Lorsque le minerai est proche de la surface, l'extraction se fait dans des fosses à ciel ouvert, lorsqu'il est

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**DÉBLAIS (EXTRACTION HORS TERRE VÉGÉTALE) : 26 300 000 m<sup>3</sup>**

**REMBLAIS TOTAUX : 19 940 000 m<sup>3</sup>**

- Dont corps de remblais : 12 660 000 m<sup>3</sup>
- Dont matériaux à usage spécifique : 7 280 000 m<sup>3</sup>
  - Matériaux à usage spécifique valorisés du site : 4 705 000 m<sup>3</sup>
  - Matériaux à usage spécifique en fournitures extérieures : 2 575 000 m<sup>3</sup>

**BILAN DÉTAILLÉ DES BESOINS EN MATÉRIAUX À USAGES SPÉCIFIQUES :**

- Matériaux ZI/ZH : 850 000 m<sup>3</sup>
- Blocs techniques/Matériaux sélectionnés : 1 195 000 m<sup>3</sup>
- Purges/Substitutions/Bases drainantes/Enrochements : 1 850 000 m<sup>3</sup>
- Matériaux drainants : 660 000 m<sup>3</sup>
- PST : 865 000 m<sup>3</sup>
  - Dont PST sous structure grave-bitume : 600 000 m<sup>3</sup>
- Couche de forme routière : 555 000 m<sup>3</sup>
- Couche de forme ferroviaire granulaire : 565 000 m<sup>3</sup>
- Couche de forme ferroviaire traitée : 35 000 m<sup>3</sup>
- Sous-couche ferroviaire granulaire : 305 000 m<sup>3</sup>
- Couche de réglage (solution GB) : 305 000 m<sup>3</sup>
- Sous-couche ferroviaire en grave-bitume : 105 000 m<sup>3</sup>

**VOLUME TOTAL DE MATÉRIAUX TRAITÉS : 9 560 000 m<sup>3</sup>**

**QUANTITÉ DE CHAUX : 276 000 t**

**QUANTITÉ DE LIANT HYDRAULIQUE : 129 000 t**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**PROJET EN PPP : Réseau Ferré de France / Eiffage**

**MAÎTRE D'OUVRAGE : ERE - Eiffage Rail Express**

**MAÎTRE D'ŒUVRE : CLERE - Construction Ligne Eiffage Rail Express**

**ENTREPRISE : Eiffage Travaux Publics**

## ABSTRACT

### BPL HSL - EARTHWORKS OPEN THE PATH

EIFFAGE TP: RACHEL TERMINAUX-ROSSA - OLIVIER PRINET - PATRICE CHARDARD

The route of the BPL HSL passes through lands which represent more than 500 million years of geological history. From the sands of the Cenomanian to the shales of the Brioverian, all the earth structures incorporate the characteristics of the formations passed through, for maximum exploitation of backfill materials and optimisation of structural detailing. The organisation and material and human resources employed are in line with the challenge of delivering 220 km of tracks by the spring of 2015. □

### LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD BURDEOS-PAÍSES DEL LOIRA (LGV BPL) - LOS MOVIMIENTOS DE TIERRAS ABREN LA VÍA

EIFFAGE TP: RACHEL TERMINAUX-ROSSA - OLIVIER PRINET - PATRICE CHARDARD

El trazado de la línea de alta velocidad Burdeos-Países del Loira atraviesa terrenos que representan más de 500 millones de años de historia geológica. Desde las arenas del Cenomaniano hasta los esquistos del Brioveriano, todas las estructuras en tierra integran las características de las formaciones que atraviesan para valorizar al máximo los materiales en terraplenado y optimizar las disposiciones constructivas. La organización, así como los medios materiales y humanos utilizados, están a la altura del reto: entregar 220 km de vías en primavera de 2015. □





1

© G. ARNAUD

# LES OUVRAGES D'ART DE LA LGV BPL

AUTEURS : ÉLISABETH TOUBOLIC, MAÎTRISE D'ŒUVRE GÉNÉRALE OUVRAGES D'ART, EIFFAGE TP - GILLES DELPLACE, MAÎTRISE D'ŒUVRE GÉNÉRALE OUVRAGES D'ART, EIFFAGE TP - FABRICE NÉEL ET JEAN-PIERRE DUVAL, ARCHITECTES - DANIEL PRATS, RÉFÉRENT MAÎTRISE D'ŒUVRE OUVRAGES D'ART, SETEC TPI - CHRISTOPHE SANDRÉ, DIRECTEUR DES TRAVAUX GÉNIE CIVIL, EIFFAGE TP

LA MAÎTRISE DES DÉLAIS, DES COÛTS ET DES RISQUES, LE RECOURS À L'INGÉNIERIE CONCORRANTE, LA QUALITÉ DE LA CONCERTATION ET LE RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT VONT PERMETTRE À EIFFAGE DE MENER À BIEN LA CONCEPTION ET LA CONSTRUCTION DE L'INFRASTRUCTURE DE 214 KM DE LIGNE LGV EN 4 ANS SEULEMENT APRÈS LA SIGNATURE DU CONTRAT. LA FIN DES TRAVAUX DE L'INFRASTRUCTURE DE LA LIGNE EST PRÉVUE POUR JUILLET 2015. LE PROJET COMPORTE 241 OUVRAGES D'ART DONT UNE TRANCHÉE COUVERTE DE 350 M DE LONG, 9 VIADUCS FERROVIAIRES ET 4 PONTS-RAIL FRANCHISSANT L'AUTOROUTE.

## RÉPARTITION DES OUVRAGES D'ART

L'objectif de la ligne nouvelle LGV BPL consiste à prolonger la ligne LGV Atlantique Paris- Conneré jusqu'à Rennes. Destinée à être circulée à la vitesse de 320 km/h, elle a une longueur d'environ 214 km nécessitant la construction de 241 ouvrages d'art dans un délai de moins de 4 ans. La plupart des ouvrages d'art remarquables est concentrée au nord de Laval et du Mans. En phase de conception des ouvrages

d'art, le projet est découpé en 3 sections (figure 2) comprenant chacune 2 ou 3 TOARC de 20 à 30 km de longueur totale chacun.

Le découpage de l'exécution des travaux est fait en cohérence avec la phase conception de telle manière que les ingénieries responsables du développement du projet puissent se muer en maîtrise d'œuvre des mêmes sections.

Les ouvrages sont regroupés en 2 grandes familles :

**1- Viaduc du Vicoin.**

**1- Vicoin viaduct.**

→ Les Ouvrages d'Art Courant (OAC) au nombre de 227 comprenant 124 ponts routiers, 101 ponts-rails dont 47 ouvrages hydrauliques et 2 murs de soutènement :

- Pour les ouvrages de portée moyenne, le choix se porte sur des ponts-rail et ponts-route avec des tabliers à poutres préfabriquées. Cette solution permet une mise en place sans cintre sur la voie ou le cours d'eau franchi et permet un gain de temps dans l'exécution des travaux.

- Pour les ponts-route dans les zones de fort déblai et les ponts-rails de petite portée, les solutions classiques de type cadres

FIGURE 2 : SECTIONS DU TRACÉ

<b>Section Est :</b> TOARC E, F et G	76 km entre Connerré et Ballée et 3 raccordements	52 ponts routiers, 47 ponts-rails, 2 viaducs ferroviaires et 2 franchissements au-dessus de l'autoroute
<b>Section Centre :</b> TOARC C et D	45 km et 1 raccordement entre Ballée et Le-Genest-Saint-Isles	24 ponts routiers, 15 ponts-rails, 6 viaducs ferroviaires, 2 franchissements au-dessus de l'autoroute et 2 murs de soutènement
<b>Section Ouest :</b> TOARC A et B	60 km et 1 raccordement entre Le-Genest-Saint-Isles et Rennes	48 ponts routiers, 39 ponts-rails, 1 tranchée couverte de 350 m et 1 estacade ferroviaire

et voûtes en béton armé sont retenues.

→ Les Ouvrages d'Art Non Courant (OANC) au nombre de 14 :

Pour le franchissement des brèches importantes, il est fait appel à des tabliers mixtes ou métalliques largement utilisés sur les lignes à grande vitesse construites en France.

**LES GRANDES LIGNES DE LA CONCEPTION EXIGENCES PARTICULIÈRES DU CONTRAT PPP : RÉFÉRENTIEL TECHNIQUE**

La conception et la construction doivent répondre à des objectifs définis dans un programme fonctionnel, à des spécifications techniques et à des engagements et contraintes de site, partie intégrante du contrat.

De plus, la conception et la construction doivent être conformes à un référentiel technique mentionné au contrat et, en termes de niveau de sécurité, la ligne doit être Globalement Au Moins Equivalente (GAME) à la LGV Est Européenne. Pour les ouvrages d'art, leur conception doit ainsi privilégier des structures classiques, durables, simples de conception et largement éprouvées, permettant un entretien minimal compatible avec la maîtrise de la circulation ferroviaire. Ils doivent rester esthétiques et bien intégrés dans l'environnement.

**CONCEPTION PARASISMIQUE**

Le dimensionnement des ouvrages au séisme est conforme à l'Eurocode 8 suivant le nouveau zonage de la France et l'arrêté du 26 octobre 2011 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique des ponts. Les zones traversées sont de sismicité faible. En plus du séisme ELU habituel, il est considéré un séisme ELS de moindre occurrence sous lequel le comportement de la structure reste dans le domaine élastique et pour lequel les déformations et déplacements des ponts rails doivent respecter des contraintes spécifiques définies dans le référentiel technique.

Le paramètre de sol « S » variant fortement suivant le classement du sol,

des essais géophysiques MASW sont réalisés sur les grands ouvrages pour permettre une classification précise du site sismique.

**SPÉCIFICATIONS RELATIVES AU COMPORTEMENT DYNAMIQUE**

Les effets dynamiques sur les ponts-rail sont étudiés suivant les prescriptions de l'Eurocode 1 avec les modèles de charge HSLM et une vitesse maximale multipliée par 1,2.

L'analyse modale de l'ouvrage permet de déterminer les vitesses critiques pour chaque convoi roulant. Le calcul est donc fait pour chaque convoi avec

sa vitesse critique, la vitesse nominale du tronçon et la même vitesse majorée de 20%. Ces calculs sont faits sur la base d'une modélisation 3D. À proximité des vitesses de résonance, le pas des vitesses est resserré pour mieux appréhender les pics.

Comme le prévoit l'Eurocode, les calculs dynamiques sont conduits avec une fourchette de poids propre haute et basse.

**LES OUVRAGES D'ART COURANT**

**LES PONTS-ROUTES**

La structure standard retenue en majorité pour les ponts-route est un tablier à poutres préfabriquées en béton armé (figure 4) surmontées d'un hourdis de 20 cm coulé en place et posé sur ses appuis via des appareils d'appui en néoprène.

Ce choix est motivé par une recherche de standardisation du procédé de construction adapté à la réalisation d'ouvrages en grande série. ▷

2- Sections du tracé.  
3- Toarc C, F et G concentrant les grands ouvrages d'art.

2- Sections of the route.  
3- TOARC project phases C, F and G contain the main engineering structures.







FIGURES 4, 5 & 6 © EIFFAGE TP - FIGURE 7 © G. ARNAUD

Des méthodes différentes sont retenues sur les différents lots pour disposer les poutres en phase provisoire :

- Soit elles sont posées sur un dispositif d'échafaudages provisoires ;
- Soit elles reposent sur des dispositifs appuyés sur la tête de pile. Ces outils de pose des poutres, appelés « OPTIMISE PBA » permettent le passage des échelons de terrassement avec un minimum de points de blocage et améliorent le rendement de réalisation du tablier (entre le début du montage et son transfert sur l'ouvrage suivant, le temps moyen par ouvrage est de treize jours). Ils sont développés par Eiffage TP en collaboration avec CoffrageEquipage.

Des choix différents sont également réalisés sur la géométrie des poutres préfabriquées :

- Une section de poutre rectangulaire appui de prédalles béton est mise en place sur 4 TOARC ;
- Une section de poutre en double T avec ailettes est retenue sur 3 TOARC.

#### LES PONTS-RAIL

Pour les ponts-rail, le choix se porte en majorité sur des structures de

type cadre ou portique pour le cas des ouvrages ballastés ou faiblement enterrés, ou sur des structures de type voûte préfabriquée (figure 5) avec une couverture de terre importante.

Dans le cas des franchissements de cours d'eau à enjeux environnementaux ou de ligne ferroviaires en exploitation (figure 6), une préfabrication partielle de la traverse est mise en œuvre pour s'affranchir de l'étalement au-dessus de l'obstacle franchi, offrant par là-même un gain de temps dans la réalisation des ouvrages.

#### LES TRANCHÉES COUVERTES

La LGV BPL compte sept ouvrages de type tranchée couverte. Ces ouvrages sont traités par deux types génériques de structures : soit de type voûte préfabriquée Matière (figure 7), soit en portique avec des piédroits réalisés en palplanches.

L'avantage principal des structures de type voûte préfabriquée est la rapidité d'exécution. Ces structures sont mises en œuvre sous des rétablissements routiers à niveau contraint, avec de très faibles couvertures.

Dans ces cas spécifiques, des éléments de clé de voûte surbaissés sont utilisés pour permettre de respecter

**4- Pont routier - tablier poutres préfabriquées.**

**5- Pont-rail - voûte.**

**6- Saut de mouton de La Courbe.**

**7- Tranchée couverte de Louverné - voûte.**

**4- Road bridge - prefabricated-girder deck.**

**5- Railway bridge - arch.**

**6- La Courbe flyover.**

**7- Louverné cut-and-cover tunnel - roof.**

les contraintes sur le profil des voies rétablies.

Dans le cas des portiques avec piédroits en palplanches, l'ouvrage est réalisé en top-down, l'intérieur de la tranchée étant excavé en taupe après finalisation de la traverse.

#### PARTI ARCHITECTURAL

Les ouvrages d'art sont conçus sobrement et simplement, la qualité étant affirmée dans la réalisation, le traitement des matériaux et l'attention aux détails, notamment les accastillages d'accompagnement (gardes corps, corniches, anti bruits, etc.).

L'identité et la reconnaissance de la LGV BPL se traduit dans la systématique de traitement des éléments architectoniques (piles, culées, perrés, murs de soutènement) sur l'ensemble de la ligne. La légèreté et la finesse des structures contribuent à garantir la meilleure insertion possible des ouvrages dans les paysages divers rencontrés.

#### LES VIADUCS FERROVIAIRES

D'une manière générale, le dimensionnement des ouvrages de franchissement des cours d'eau est conçu de façon à respecter les enjeux relatifs aux rétablissements hydrauliques ainsi que les enjeux écologiques (maintien de la qualité des eaux, des lits mineurs, des habitats et des espèces).

Le respect de l'ensemble de ces contraintes implique la réalisation de 9 viaducs ferroviaires.

La largeur utile du tablier adoptée pour les ouvrages de la zone LGV voyageur est de 12,30 m. Pour la zone LGV en mixité avec le fret, les tabliers sont plus larges de 30 cm compte tenu que l'entraxe des voies varie de 4,50 m à 4,80 m.

Suivant la configuration des brèches et des contraintes de franchissement, les travures proposées pour l'ensemble des OANC se situent dans le domaine d'emploi des ouvrages à tablier de type bipoutre mixte. Ce type de tablier permet une rapidité d'exécution et un impact chantier limité aux zones d'appuis.

**OUVRAGES BIPOUTRE À HAUTEUR CONSTANTE ET/OU DOUBLE EFFET MIXTE**

La structure mixte du tablier comprend 2 poutres principales espacées de 6 m, surmontées par un hourdis en béton armé de 35 cm d'épaisseur dans sa

partie centrale et 20 cm en extrémité de dalle. L'élanement du tablier est d'environ 1/14 (y compris dalle). Le contreventement transversal est assuré par des dalles en béton indépendantes reliant les semelles inférieures des poutres.

Cela permet par la suite de visiter l'intérieur du tablier via les culées.

Une solution innovante basée sur le concept de la double action mixte a été appliquée à trois viaducs de la LGV (Vicoin, Quartier et la Courbe). Le hourdis inférieur est rendu continu dans les zones sur appuis intermédiaires pour exploiter au maximum la mixité de la structure, ce qui permet de réduire les quantités d'acier de charpente à mettre en œuvre et d'augmenter la rigidité de la structure pour un meilleur comportement dynamique général sous le passage de trains à grande vitesse.

Les bipoutres mixtes permettent une lecture claire du franchissement et s'inscrivent sobrement dans les paysages rencontrés : « une simple ligne, traversant le paysage ».

La position des viaducs dans ces paysages conduit à distinguer 3 familles

(figure 10), en fonction de leurs longueurs, hauteurs par rapport au sol et leur schéma fonctionnel. Ces différentes « familles » ont naturellement une architecture différente dérivée à partir du même modèle, toujours dans un souci d'uniformisation et de reconnaissance de la LGV dans les territoires traversés.

**OUVRAGES BIPOUTRE À HAUTEUR VARIABLE**

La Sarthe et la Mayenne sont les deux plus grands cours d'eau franchis par la Ligne LGV BPL. Le respect des enjeux environnementaux impose dans les deux cas une travée principale de 67 m. Pour le cas du viaduc de la Sarthe (figure 12), la longueur totale de l'ouvrage, de 433 m, résulte d'une analyse hydraulique ; l'objectif est de limiter au minimum l'impact de l'ouvrage sur le comportement du cours d'eau en cas de crue. Le viaduc de la Mayenne (figure 11) s'inscrit dans une vallée plus marquée et sa longueur de 222 m résulte d'une réflexion géométrique sur la morphologie de la vallée. Pour ces deux ouvrages spécifiques, vu l'importance de la travée principale, une hauteur variable est appliquée aux poutres métalliques ( $H_{max} = 5,35$  m,  $H_{min} = 3,90$  m).

Ouvrages remarquables, ils engendrent des impacts qui ont été pris en compte à la fois dans la réponse architecturale (traitement des éléments singuliers) et dans la recherche de la meilleure intégration paysagère. Leurs éléments architectoniques s'inscrivent dans la même démarche que ceux de l'ensemble des ouvrages en s'adaptant aux échelles et aux sites rencontrés. La structure du tablier de hauteur variable permet d'accompagner ces grandes portées, ce qui accroît la légèreté et la perméabilité du projet.

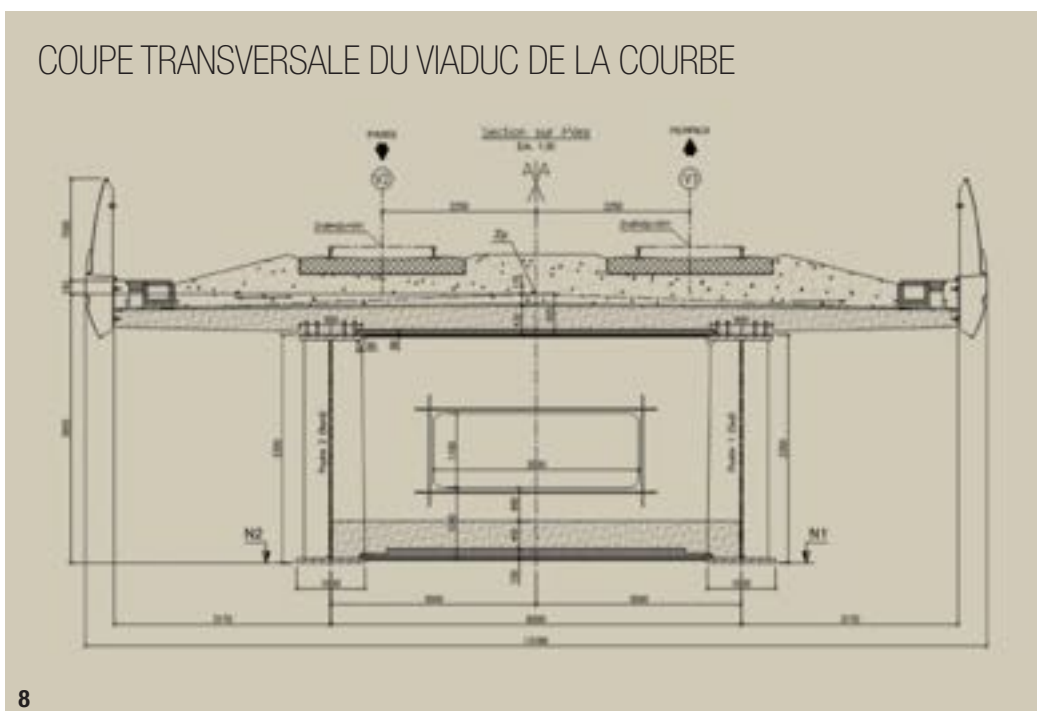
**8- Coupe transversale du viaduc de la Courbe.**

**9- Caractéristiques principales des viaducs ferroviaires.**

**8- Cross section of La Courbe viaduct.**

**9- Main characteristics of railway viaducts.**

COUPE TRANSVERSALE DU VIADUC DE LA COURBE



CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES VIADUCS FERROVIAIRES

Nom	TOAFC	Nom	Bais	Longeur	Longueur	Travées	Hauteur poutres	Élanement
Écluse de Vicoin	B	VA 1226-506	100 0	11,58	256,00	27,00 + 31,00 + 27,75 + 28,125 + 30,00 + 30,00 + 30,00 + 30,00 + 28,125	2,20	1/14,00
Viaduc de Vicoin	C	VA 1183	100 0	12,30	333,10	35,00 + 62,00 + 62,00 + 62,00 + 62,00 + 62,00 + 62,00 + 38,50	3,50	1/14,85
Viaduc de la Mayenne	C	VA 1104	100 0	12,30	223,50	60,00 + 60,00 + 60,00 + 42,00	3,00 à 5,00	-
Viaduc du Quartier	C	VA 1063	100 0	12,30	254,50	37,50 + 45,00 + 45,00 + 45,00 + 45,00 + 42,00	2,75	1/16,72
Viaduc de la Juverna	D	VA 0887	100 0	12,30	110,40	25,00 + 34,00 + 34,00 + 25,00	2,40	1/14,16
Viaduc de la Voie	D	VA 0687	100 0	12,30	105,40	33,00 + 33,00 + 33,00	2,40	1/16,83
Viaduc de l'Érue	D	VA 0789	100 0	12,30	145,40	33,50 + 35,00 + 35,00 + 33,00	2,50	1/16,6
Viaduc de la Courbe	F	VA 0250	100 0	12,60	378,10	37,00 + 50,00 + 30,00 + 30,00 + 50,00 + 50,00 + 50,00 + 37,00	3,25	1/13,38
Viaduc de la Sarthe	G	VA 0214	100 0	12,60	435,00	65,50 + 63,00 + 63,00 + 44,00 + 44,00 + 44,00 + 44,00 + 32,00	3,25 à 4,75	-





10a



10b



10c



11

© EIFFAGE TP

**RÉALISATION DES OUVRAGES :**

**Les Fondations :**

Les dispositifs de fondation mis en œuvre sur les principaux viaducs de la LGV BPL sont hétérogènes et adaptés aux contextes géotechniques locaux rencontrés. En pratique, le choix du type de fondation est orienté en fonction d'une profondeur limite du bon sol fixée à 5 m.

Ainsi, les piles des viaducs du Quartier, de la Mayenne et de la Sarthe sont-elles fondées de manière superficielle, profitant d'un substratum rocheux à faible profondeur.

Le viaduc de la Courbe est, quant à lui, entièrement fondé sur pieux en raison d'un contexte géologique défavorable (piles courantes fondées sur 6 pieux Ø 1 400 à 1 800 mm et de longueur comprise entre 15 m et 25 m).

Les autres viaducs présentent, quant à eux, des systèmes de fondation mixtes, certaines piles étant fondées superficiellement et d'autres sur pieux.

Pour la majorité des ouvrages, le point fixe longitudinal est placé sur les culées, dont la structure massive s'adapte naturellement à la reprise d'efforts horizontaux importants. On notera les exceptions du viaduc de la Courbe où

le rôle de point fixe est joué par 2 piles voisines, en raison de la faible qualité des sols, et de l'estacade du Vicoin où les points fixes des deux tabliers indépendants sont réalisés chacun via une pile-culée.

**Les appuis :**

Les piles des viaducs du Quartier, de la Mayenne et du Vicoin présentent toutes une conception identique, avec des gammes de hauteur similaires (2 à 3 m), le fût étant évidé (section en plan 5x3 m) et le chevêtre plein. Ces fûts sont réalisés à l'aide de trois coffrages spécifiques répartis sur les 22 piles des quatre viaducs concernés. Les levées se déroulent sur un rythme moyen de 2 jours par levée de 4 m. Le ferrailage du chevêtre est assemblé au sol sur la base du coffrage du chevêtre et mis en œuvre une fois atteint le sommet des piles.

Les piles du viaduc de la Sarthe sont des doubles fûts pleins de faible hauteur (de 4 m à 5,40 m). Elles ont été réalisées à l'aide d'un coffrage circulaire de 3,20 m de diamètre en tête avec un fruit de 3%.

Les piles du viaduc de la Courbe sont des piles creuses de section constante. Les points fixes ont une section de 8 x

**10a, 10b & 10c-  
Trois familles  
de piles.**

**11- Viaduc de  
la Mayenne.**

**10a, 10b & 10c-  
Three categories  
of piers.**

**11- La Mayenne  
viaduct.**

4,50 m, et les piles courantes ont une section de 8 x 3 m. Elles sont réalisées à l'aide d'un outil coffrant qui permet de réaliser la totalité des fûts de pile et des chevêtres. La cadence de réalisation est de 2 jours par levée. La totalité des cages d'armatures est préfabriquée afin de limiter les interventions de l'armaturier sur le chemin critique.

**Les tabliers :**

La structure métallique de l'ensemble des viaducs a été mise en œuvre de manière similaire. La charpente a été fabriquée dans les ateliers d'Eiffage Construction Métallique (Usine de Lauterbourg), assemblée au sol sur des plateformes aménagées derrière les culées des ouvrages avant d'être lancée

sous la supervision des équipes d'Ecm. La Sarthe fait figure d'exception. Le positionnement du viaduc ne permet pas la réalisation d'une plateforme de lancement à l'arrière d'une culée. La solution retenue est donc de mettre en place le tablier en 2 grandes phases :

→ **1<sup>re</sup> phase** : mise en place de la partie à hauteur variable, soit 150 m de long par lancement ;

→ **2<sup>e</sup> phase** : mise en place du reste de la charpente métallique par grutage directement sur les appuis définitifs.

Pour les structures à hauteur variable, la spécificité des lancements consiste à alterner les phases d'avancement et de dévérinage. Ceci induit un allongement des temps de lancement.

Concernant le hourdis supérieur en béton armé, deux techniques différentes sont appliquées. Soit le hourdis est bétonné sur des prédalles non collaborantes installées sur la charpente avant le lancement, soit le hourdis est réalisé avec un équipement mobile. Dans ce dernier cas de figure, le niveau supérieur des diaphragmes de la charpente est abaissé pour permettre le passage de l'équipage lors de son déplacement le long de l'ouvrage.



12

© G. ARNAUD

### LES FRANCHISSEMENTS AUTOROUTIERS

Pour les franchissements des autoroutes A81 et A28, le type d'ouvrage choisi est :

- Soit le tablier mixte quand le gabarit routier et le biais de franchissement ne pas trop prononcés ;
- Soit le tablier métallique à poutres latérales (RAPL) dès que le gabarit est très réduit ou le biais de franchissement important. Ce type de structure permet une grande souplesse au niveau de l'implantation des appuis.

Dans le chapitre suivant, est détaillé le principe du RAPL.

- 12- Viaduc de la Sarthe.
- 13- Coupe transversale RAPL.
- 14- Caractéristiques principales des franchissements autoroutiers.

12- La Sarthe viaduct.

13- Cross section of side girder rail bridge.

14- Main characteristics of motorway crossings.

### DESCRIPTION DU RAPL

La coupe transversale type du tablier s'apparente à celle déjà mise en œuvre sur le viaduc de la Savoureuse de la LGV Rhin-Rhône branche Est.

Il est composé de grandes poutres portant, latéralement aux voies, des pièces de pont transversales de 1,05 m de hauteur espacées de 2,50 m environ et supportant une dalle en poutrelles enrobées de 30 cm d'épaisseur. La dalle en poutrelles enrobées est liaisonnée aux pièces de pont par des goujons. Malgré le biais du franchissement, le tablier est droit à ses extrémités, pour une bonne transition tablier-plateforme au droit des culées.

La plateforme autoroutière à franchir est d'une largeur droite de 27 m environ. Le gabarit vertical à dégager sur l'A81 est de 4,95 m. Il inclut une marge de 10 cm permettant le rechargement de la couche de roulement et une revanche de 5 cm pour couvrir les tolérances d'exécution et la déformée du tablier.

Le tablier étant intégré dans l'épaisseur structurelle, les deux hautes poutres latérales constituent l'élément longitudinal marquant de ces franchissements (figure 15).

L'architecture des piles et des culées tente d'apporter de la profondeur à l'ouvrage dans son sens transversal et améliore sa lecture par les automobilistes.

Les piles sont donc transcrites en fonction des sens de circulation routière, en y intégrant des perspectives sous ouvrages, tout en y associant l'ensemble des contraintes routières ou techniques, tels que les GBA, glissières et chevêtres.

Le demi-voile dégressif accompagne l'automobiliste lors du passage sous le franchissement et offre un sens de lecture unique pour chacune des voies de circulation.

COUPE TRANSVERSAL RAPL



13

### CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES FRANCHISSEMENTS AUTOROUTIERS

Nom	TOAFC	Autoroute	Biais	Type d'ouvrage	longeur	longueur	Travées	Hauteur	Bancement
PPA 1206	C	A81	24,3	RAPL	12,30	113,72	30,47/241,425 + 40,00 + 40,75/602,744	3,90	1 / 10,9
PPA 1068	C	A81	190,4	RAPL	12,35	199,72	29,09 + 41,31/48,75 + 48,75 + 48,75/41,91 + 29,40	4,50	1 / 10,8
PPA 0357	F	A81	78,15	Épave mixte	12,30	113,50	18,00 + 24,00 + 32,00 + 24,00 + 18,00	2,00	1 / 16,00
PPA 0238	G	A28	134,1	Épave mixte	12,60	75,60	21,00 + 31,00 + 21,00	2,15	1 / 14,41

14





15

© G. ARNAUD



16

© EIFFAGE TP

Les culées se veulent les plus discrètes possibles, dans le cas de culées droites elles comportent des joints creux accentuant les perspectives.

#### RÉALISATION

##### Les appuis :

Les appuis étant réalisés sur le domaine autoroutier de Cofiroute, les dimensions des semelles sont étudiées pour offrir la moindre emprise possible sous la chaussée et permettre un phasage de déviation raisonnable.

Ainsi, les semelles présentent-elles une largeur de 4 m, avec une longueur variable en fonction de la hauteur des piles. Les semelles sont réalisées à l'abri d'une paroi en béton projeté clouée.

Les piles se font en 4 phases (embase, fût, murs latéraux et chevêtre).

Les coffrages utilisés sont un mixte entre banches et négatifs.

##### Les tabliers :

De même que pour la plupart des viaducs à tablier mixte, la charpente des deux ouvrages à poutres latérales est fabriquée dans les ateliers d'Ecm à Lauterbourg, assemblée au sol derrière les culées avant d'être lancée au-dessus de l'autoroute.

Le ferrailage du hourdis en poutrelles enrobées est monté au sol par éléments de 7x12 m, les poutrelles étant réglées géométriquement avant enfilage des barres du ferrailage puis assemblage sur la charpente métallique.

En raison de la particularité de ce type de franchissement, le hourdis des deux ouvrages est bétonné avant lançage (poids des tabliers au lançage 2 000 t et 3 000 t). Les lançages (figure 16) sont réalisés de

nuit avec fermeture totale du réseau autoroutier.

Des vérins avaleurs de câbles permettent la maîtrise complète du lançage lors des avancements et une sécurité optimale. □

15- PRA 1058.

16- PRA 1205.

15- Rail  
bridge 1058.

16- Rail  
bridge 1205.

#### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

**NOMBRE OA : 241 u**

**SURFACE HT : 107 900 m<sup>2</sup>**

**BÉTON : 156 800 m<sup>3</sup>**

**ACIER FERRAILLAGE : 19 200 t**

**ACIER CHARPENTE : 11 100 t**

#### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

**LE CONCÉDANT : RFF**

**LE CONCESSIONNAIRE - MAÎTRE D'OUVRAGE : ERE**

**GROUPEMENT CONSTRUCTEUR - MAÎTRE D'ŒUVRE : CLERE**

**ARCHITECTES : Néel Architecture - Duval Architecture**

**GROUPEMENT D'INGÉNIERIE : Ingerop - Setec - Eiffage**

**ENTREPRISES :**

• Génie civil : Eiffage TP

• Métal : Eiffage Construction Métallique

**PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS :**

• Béton : Lafarge - Point P - Minier Béton - Sbl

• Aciers passifs : Sendin SA - Samt

• Étanchéité : Eurovia - Smac

• Joints de chaussée et joints Garde ballast : Freyssinet - Rca - Etic

• Préfabrication des poutres : Capremib - Matière/Froc

**ÉTUDES D'EXÉCUTION :**

• Viaducs mixtes : Igoa - Ioa - Ecm (Métal)

Coredia - Stoa - Biep - Cogeci (GC)

• Viaducs RAPL : Ccs (Métal) - Coredia (GC)

• OAC : Cogeci - Bea - Siam - Biep - Aria - Itc - Setec

#### ABSTRACT

#### ENGINEERING STRUCTURES FOR THE BPL HSL

É. TOUBOULIC, EIFFAGE TP - G. DELPLACE, EIFFAGE TP - F. NÉEL ET J.-P. DUVAL - D. PRATS, SETEC TPI - C. SANDRÉ, EIFFAGE TP

**The project involves** the execution of a new double-track high-speed rail line about 214 km long, including 32 km of connections to existing lines and 25 km of combined freight/passenger lines north of Le Mans. This new BPL high-speed rail line will allow a time saving of 37 minutes between Paris and Rennes. The project includes 241 engineering structures: 124 road bridges, 101 railway bridges, 2 major retaining walls, 1 cut-and-cover tunnel about 350 m long, 9 railway viaducts and 4 railway bridges crossing the motorway. Most of the noteworthy engineering structures are concentrated north of Laval and Le Mans. □

#### LAS OBRAS DE INGENIERÍA DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD BURDEOS-PAÍSES DEL LOIRA (LGV BPL)

É. TOUBOULIC, EIFFAGE TP - G. DELPLACE, EIFFAGE TP - F. NÉEL ET J.-P. DUVAL - D. PRATS, SETEC TPI - C. SANDRÉ, EIFFAGE TP

**El proyecto consiste** en la realización de una nueva línea de alta velocidad de doble vía de cerca de 214 km, de los cuales, 32 km de conexiones hacia las líneas existentes y 25 km de líneas mixtas mercancías/viajeros al norte de Le Mans. Esta nueva línea de alta velocidad Burdeos - Países del Loira permitirá reducir 37 minutos la duración del trayecto entre París y Rennes. El proyecto incluye 241 obras de ingeniería: 124 puentes de carretera, 101 puentes ferroviarios, 2 importantes muros de contención, 1 falso túnel de cerca de 350 m de longitud, 9 viaductos ferroviarios y 4 puentes de carretera que cruzan la autopista. La mayoría de las obras de ingeniería destacables están concentradas al norte de Laval y de Le Mans. □

## 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 plus de **270 000 salariés**.

### Nos coordonnées :

- **Par courrier :**  
31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09
- **Par Internet :** [www.cnetp.fr](http://www.cnetp.fr)
- **Par mail :** sur [www.cnetp.fr](http://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



# RÉPERTOIRE DES FOURNISSEURS

# TRAVAUX

DEPUIS 1917, LA REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

Nous vous invitons à découvrir prochainement dans **TRAVAUX**, une nouvelle présentation du répertoire des fournisseurs de matériels, équipements ou services. Des rubriques simplifiées pour une meilleure identification des métiers, nouveaux formats publicitaires pour optimiser la lisibilité des annonceurs. Nous sommes à votre disposition pour vous commenter et réserver l'emplacement publicitaire de votre choix.

**Pour réserver contactez Rive média :**

**Bertrand COSSON**

Tél. 01 42 21 89 04

[b.cosson@rive-media.fr](mailto:b.cosson@rive-media.fr)

**Carine REININGER**

Tél. 01 42 21 89 05

[c.reininger@rive-media.fr](mailto:c.reininger@rive-media.fr)





1

© CLERE (CYRILLE BEAUX)

# LGV BPL : CAS D'ÉCOLE DE L'APPLICATION DE LA DÉMARCHE ENVIRONNEMENTALE « ÉVITER, RÉDUIRE ET COMPENSER »

AUTEURS : SANDRINE CHOTARD, RESPONSABLE ENVIRONNEMENT, EIFFAGE RAIL EXPRESS (ERE) - LAURENCE FREMONDIÈRE, CHARGÉE D'ÉTUDES ENVIRONNEMENT, SETEC INTERNATIONAL - LÉNA PETIT, CHARGÉE ENVIRONNEMENT, CONSTRUCTEUR DE LA LIGNE EIFFAGE RAIL EXPRESS (CLERE)

VITRINE DU SAVOIR-FAIRE EN MATIÈRE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE PROJET CLE EN MAIN DU GROUPE EIFFAGE, LA LIGNE GRANDE VITESSE BRETAGNE - PAYS DE LA LOIRE ILLUSTRE TOUTES LES ÉTAPES DE PRISE EN COMPTE DE LA DOCTRINE « ÉVITER, RÉDUIRE ET COMPENSER » DANS LA CONCEPTION, LA CONSTRUCTION ET LA MAINTENANCE D'UNE GRANDE INFRASTRUCTURE LINÉAIRE.

## ÉVITER PAR ANTICIPATION, UNE ACTION EN PHASE CONCEPTION DU PROJET

### L'HISTORIQUE DE LA CONCEPTION D'UN PROJET DE MOINDRE IMPACT

Le projet de la LGV BPL<sup>1</sup> remonte à plus de 22 ans, lorsque le prolongement vers Rennes et Nantes du TGV Atlantique est inscrit au Schéma Directeur National des liaisons à grande

vitesse, approuvé le 1<sup>er</sup> avril 1992. Ont suivi plusieurs programmes de projets prioritaires et plans de relance ayant confirmé le projet au niveau national. La conception de l'infrastructure est passée par différentes phases (études préalables 1994-1995/études préliminaires 1996-2001/avant-projet sommaire 2001-2006). RFF a toujours veillé à une prise en compte des enjeux environnemen-

**1 - Arbre préservé et mis en exclos en limite d'emprise.**

**1 - Tree protected and fenced outside of the boundaries of the land area used.**

taux le plus en amont possible, afin d'éviter ou de réduire, les impacts inhérents à un projet d'infrastructure linéaire. Le tracé est le résultat de ce long processus, en vue d'aboutir au meilleur compromis possible entre les contraintes techniques et économiques et le respect des intérêts des populations concernées et de l'environnement. Le tracé retenu et déclaré d'utilité publique (DUP) le 26 octobre 2007



**2- Tracé déclaré d'utilité publique dans son contexte écologique.**

**3- Extrait des contraintes environnementales - Vallée de l'Erve.**

**2- Route declared of public utility in its ecological context.**

**3- Excerpt from the environmental constraints - Erve valley.**

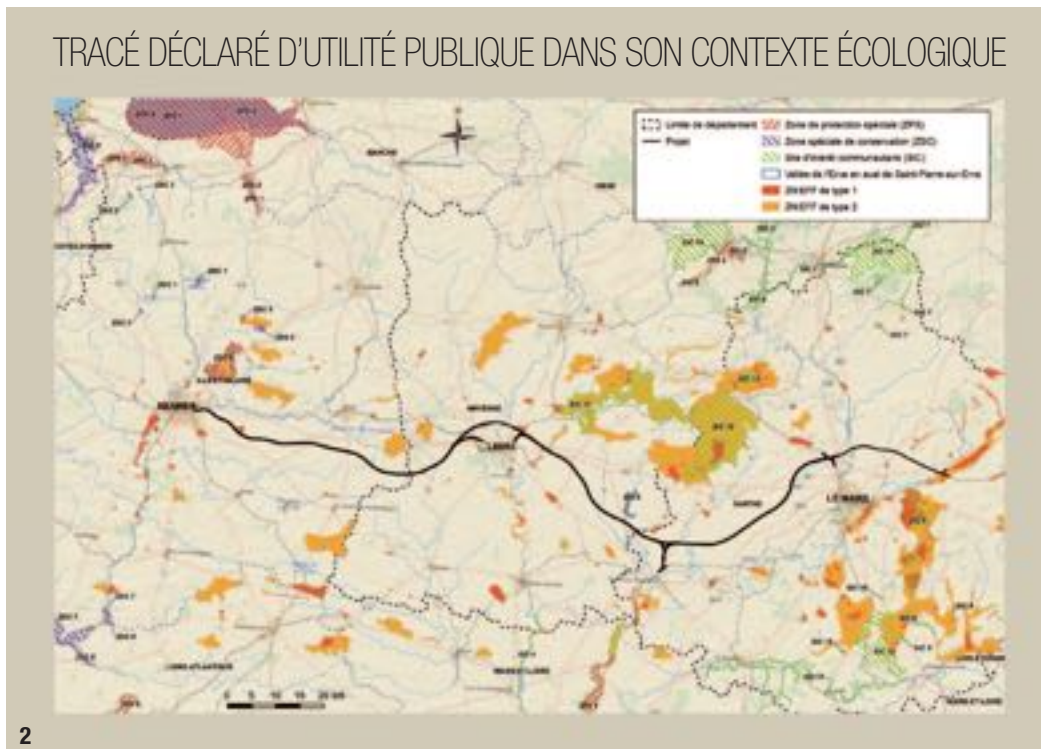
évite tous les périmètres de protection de la biodiversité (aucune zone NATURA 2000<sup>2</sup> n'est impactée) mais aussi la plupart des ZNIEFF<sup>3</sup> (une seule est traversée par le projet). Elle évite également les principaux réservoirs de biodiversité et axes majeurs de déplacement de la faune (figure 2).

Le projet s'est fortement illustré en termes d'évitement et d'intégration en amont des enjeux environnementaux.

**LES ÉTUDES D'APD ET LES PROCÉDURES RÉGLEMENTAIRES Volet Développement Durable de l'offre :**

Suite à une procédure de mise en concurrence par RFF, Eiffage Rail Express (ERE), filiale d'Eiffage à 100%, a été déclarée titulaire du contrat de Partenariat Public-Privé (dénommé Contrat) le 3 août 2011 pour le financement, la conception, la construction, le fonctionnement, l'entretien, la maintenance et le renouvellement de la LGV BPL jusqu'en 2036. À cette date, RFF disposera d'une ligne totalement renouvelée. Déjà dans l'offre d'Eiffage, divers éléments illustraient une stratégie de développement durable volontariste avec notamment :

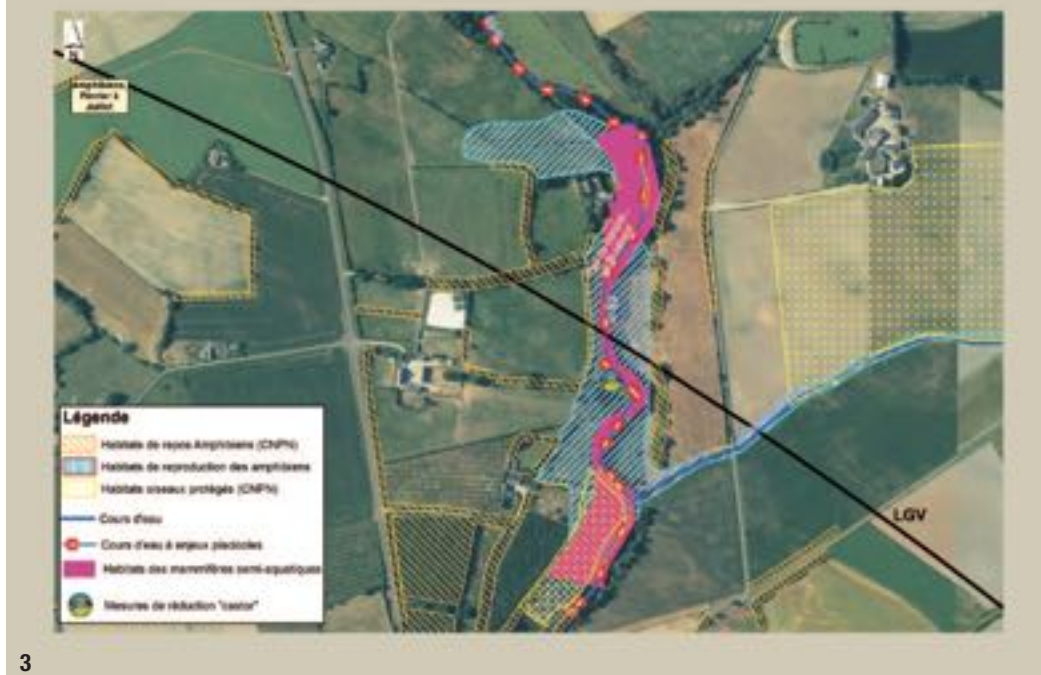
- Un planning travaux avec une saison supplémentaire de terrassement pour améliorer la réutilisation des matériaux et limiter l'utilisation des liants hydrauliques ;
- Une optimisation du mouvement de terre avec une diminution des excédents de terre de 13 à 8 millions de m<sup>3</sup> ;
- Une anticipation de la compensation écologique avec l'aide de l'ONF<sup>4</sup> ;



2

© SETEC

**EXTRAIT DES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES - VALLÉE DE L'ERVE**



3

© EXTRAIT NRE TOARC E - SETEC / INGÉROP

- Un fonds d'arbitrage technico-économique carbone pour stimuler les innovations permettant de réduire le bilan carbone de l'opération ;
- La proposition d'accroître les compétences de l'observatoire environnemental de la LGV BPL avec un volet socio-économique en plus ;
- Une action volontaire de reconquête de la biodiversité sur différents territoires autour de la LGV basée sur la démarche FIPAN<sup>5</sup>.

**Conception environnementale du tracé continuée :**

Les connaissances environnementales des territoires traversés ont été complétées par des inventaires dans la bande DUP par RFF entre 2006 et 2011. Puis, elles ont été approfondies par ERE avec des diagnostics ciblés menés dès l'annonce en janvier 2011 de sa désignation par RFF comme attributaire pressenti du contrat. Des ajustements du tracé ont permis

d'améliorer l'intégration de celui-ci dans son environnement. La transparence écologique de la LGV a été vérifiée au droit des points de conflit entre le projet et les continuités écologiques (trame verte et bleue) avec la mise en place d'ouvrages de traversée adaptés. Dans le cadre de l'optimisation du projet par ERE, la variante étudiée au nord de Laval a permis de réduire fortement l'impact sur la seule ZNIEFF concernée par le projet.





4



5



6a



6b

FIGURE 4 © GAËL ARNAUD POUR LEFFAGE RAIL EXPRESS - FIGURES 5, 6A & 6B © CLERE (CYRILLE BEAUD)

Les dossiers réglementaires (demande de dérogation à l'article L.411-1 du code de l'environnement pour la destruction du milieu particulier ou d'aires de repos d'espèces protégées - dossier CNPN<sup>6</sup>/demande d'autorisation au titre du Code de l'Environnement article L.214-1 et suivants - volet Eau et Milieux aquatiques) ont ainsi été élaborés au travers d'échanges constants avec les DREAL<sup>7</sup>, DDT<sup>8</sup>, ONEMA<sup>9</sup> et ONCFS<sup>10</sup> des territoires traversés.

Les méthodologies et entrants ont été concertés et validés lors de comités techniques réunissant l'ensemble des acteurs concernés.

Les inventaires écologiques ont fait l'objet d'une relecture critique par des spécialistes indépendants et reconnus à la fois en termes de méthodologie, de proposition de mesures de réduction d'impact et de compensation.

### RÉDUIRE LES IMPACTS : UNE DÉMARCHE TRANSVERSALE AU CŒUR D'UN GRAND CHANTIER

Après la phase de conception, des garanties doivent être apportées aux parties prenantes dans leur réalisation effective. Trois axes majeurs ressortent.

#### CONFORMITÉ DES ENGAGEMENTS

Les engagements ont été transcrits à la fois dans les documents techniques

du projet et dans les contrats avec les entreprises à travers les Notices de Respect de l'Environnement élaborés par la maîtrise d'œuvre (figure 3). L'entreprise de travaux décline ensuite les engagements environnementaux en actions spécifiques au sein du Plan de Respect de l'Environnement.

#### GOVERNANCE DÉVELOPPEMENT DURABLE

##### Organisation :

Une organisation spécifique au développement durable est instaurée à tous les niveaux opérationnels avec une trentaine de personnes dédiées au plus fort de l'activité pour : ERE, CLERE<sup>11</sup> et les chargés environnement entreprise assurant la traduction des engagements et la sensibilisation du personnel. Un Plan de Management Développement Durable assorti d'un Plan d'Actions Stratégiques Développement Durable sont déclinés par toutes les entités avec la remontée d'indicateurs pour connaître l'atteinte des objectifs pris pour la phase chantier, puis pour la phase maintenance.

##### Accord volontaire développement durable RFF-ERE :

RFF et Eiffage ont fait depuis de nombreuses années du développement durable un axe stratégique de leur politique d'entreprise.

En complément du contrat, un accord volontaire RFF-ERE a été rédigé pour

##### 4- Signature de l'accord volontaire Développement Durable RFF (Alain Quinet) - ERE (Marc Legrand).

##### 5- Investigation d'un terrier de Castor - site de la Vègre.

##### 6a & 6b- MCI en cours de creusement et 1 an après.

##### 4- Signature of the voluntary Sustainable Development agreement by RFF (Alain Quinet) and ERE (Marc Legrand).

##### 5- Investigation of a beaver's lodge - La Vègre site.

##### 6a & 6b- MCI during excavation and one year later.

officialiser cette volonté commune d'expérimenter au-delà des obligations réglementaires ou des dispositions contractuelles, la mise en œuvre opérationnelle du développement durable sur BPL.

Cet accord expose les démarches convenues pour :

- Réduire l'empreinte carbone du projet ;
- Promouvoir des actions de restauration des services écologiques de territoires situés à proximité de la LGV via la démarche FIPAN : cette action s'est concrétisée en 2013-2014 par la mise en place d'un démonstrateur sur la commune de Domloup (Ile-et-Vilaine) en partenariat avec Green Cross France & Territoires ;
- Mettre en place une politique d'achats responsables ;
- Favoriser les retours d'expériences avec des séminaires annuels RFF/ERE.

La signature de cet accord est intervenue le 14 mars 2013 (figure 4).

Les volets social et sociétal ont été également pris en compte. CLERE a mis en place une politique RSE (Responsabilité Sociale des Entreprises) et s'est dotée d'un fonds d'aide pour les PME à la mise en place de démarche de progrès type ISO (financement partiel d'un accompagnateur dans le cadre d'une certification qualité ou environnement).

#### SUIVI CHANTIER DE LA MISE EN ŒUVRE DES DIFFÉRENTES MESURES

##### Respect des mesures d'évitement :

La principale mesure d'évitement est le respect de l'emprise des travaux

qui se matérialise sur le chantier par un balisage et un affichage spécifiques permettant la protection d'espaces naturels et des berges des cours d'eau interceptés par le chantier (figure 1). La prise en compte des cycles biologiques des espèces faunistiques et floristiques pour l'organisation des travaux a été un axe fort d'évitement des impacts : opération de déboisement et de dégagement des emprises en automne, comblement de mares en dehors de la période de reproduction des amphibiens, etc.

Lors du passage d'un expert sur des sites d'habitats favorables pour le castor, un seul terrier a été repéré.

L'exploration de celui-ci a été réalisée afin de visualiser l'intérieur des cavités et de conclure qu'il s'agissait d'un gîte de passage positionné en aval du viaduc avec un retrait suffisant pour ne pas être impacté (figure 5).

#### Réduction des impacts sur le terrain, zoom sur des actions clefs :

→ Une gestion rigoureuse des plantes exotiques envahissantes a été établie avec au préalable une formation des collaborateurs. L'ensemble des spots observés a fait l'objet d'une cartographie et d'un traitement approprié.

→ Un assainissement provisoire d'envargure a été mis en place afin de traiter les eaux avant rejet dans les cours d'eau avec plus de 1 000 bassins réalisés et entretenus tout le long du chantier. Ils sont équipés selon la sensibilité du site par des systèmes de filtration et de lutte contre la pollution accidentelle. Le chantier a expérimenté 245 modules de filtration préfabriqués Modul'AP®, ayant prouvé leur efficacité (dispositif breveté par Eiffage<sup>12</sup> et primé dans la catégorie « Initiatives astucieuses » du concours 2014 de l'Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité - IDRRIM).

→ Pour les cas où le calendrier des travaux n'a pu être adapté aux cycles biologiques des espèces :

- Des transferts d'amphibiens ont été effectués par des experts habilités (17 transferts, 14 espèces, 9 000 individus concernés).

- Des investigations d'ornithologues ont été réalisées pour déceler la présence de couple ou de nid d'œdicnème criard dans des zones spécifiques (37 passages, aucun nid détecté).

→ Aux abords des mares impactées par le projet et avant leur comble-

ment, les équipes travaux ont créé des Mares de Compensation Immédiate (MCI) qui font l'objet d'un suivi de leur fonctionnalité (niveau d'eau, développement végétal, présence d'espèces) (figure 6).

→ Déplacement de terreau de Pique-prune (*Osmoderma Eremita*) en provenance des arbres impactés vers des arbres hôtes (transfert réalisé en 2012) (figure 7). Les deux arbres hôtes ont fait l'objet d'un suivi pendant les étés 2013 et 2014. Aucun individu « émergent » n'a été détecté. Le suivi sera reconduit.

→ La réalisation des travaux a entraîné un impact supplémentaire sur une espèce protégée : l'Hirondelle de rivage (*Riparia riparia*) par le comblement d'une carrière sableuse. La construction d'un front de taille artificiel (150 nichoirs) a été réalisée

**7- Transfert du terreau de pique-prune.**

**7- Transfer of Hermit beetle potting soil.**

© CLERE (CYRILLE BEAUX)



7

sur la commune de Connerré-en-Sarthe en partenariat avec l'administration et des experts locaux dont la Ligue de Protection des Oiseaux de la Sarthe. Cette installation « en dur » a été préférée à un front de taille artificiel dans un substrat meuble afin de perdurer. Ce mur et les aménagements annexes créés, au sein des emprises de la LGV, seront entretenus et bénéficieront d'un suivi scientifique (figure 8).

→ Des engagements volontaires participent à la réduction des impacts du projet avec :

- Un effort constant des équipes de limiter l'emprise travaux, notamment sur les sites sensibles comme les zones humides. En effet, entre les impacts théoriques et la réalité du terrain, le chantier a restreint son impact surfacique de 10%.

- La mise en place d'un fonds d'arbitrage carbone doté d'un budget internalisé pour subventionner des variantes techniques moins carbonées mais qui seraient plus chères que les solutions traditionnelles. À fin 2013, la mobilisation du fonds a permis d'économiser 6 600 t de CO<sub>2</sub>.

- Le Flûteau nageant (*Luronium natans*), plante aquatique protégée identifiée dans une mare lors des inventaires de 2005 n'a pas été revue lors de ceux de 2008 et 2011. En réponse au plan national d'actions consacré à cette espèce, un transfert de sédiments de la mare identifiée en 2005 a été engagé vers deux mares créées à proximité. Des inventaires réalisés en 2013 et 2014 ont confirmé la réapparition de l'espèce dans les deux mares.

### COMPENSER, UN PROJET DANS LE PROJET

#### LA PHILOSOPHIE

Compenser est la dernière phase de la doctrine ERC mais revêt un caractère stratégique. Elle passe par des réflexions très en amont, par une connaissance approfondie du territoire et de ses acteurs.

Au terme de la conception et durant les travaux, un maximum d'incidences négatives du projet aura été évité ou réduit.

La compensation des impacts résiduels se traduit par l'aménagement ou la restauration de milieux, le déplacement de certaines espèces, puis la mise en œuvre de mesures de gestion via des conventions avec différents acteurs (exploitants agricoles, particuliers, collectivités).

#### LES EXIGENCES DE COMPENSATION

Pour la LGV BPL, trois procédures impliquent une compensation écologique avec une superficie totale de 949 ha dont :

- 1- 282 ha pour la Compensation Loi sur l'Eau (zones humides, cours d'eau, mares),
- 2- 453 ha pour la Compensation Espèces Protégées (flore, chiroptères, mammifères, amphibiens, insectes, oiseaux, poissons),
- 3- 214 ha pour la Compensation Boisement (figure 9).

L'ensemble des mesures de compensation Loi sur l'eau et Espèces Protégées doit être garanti pendant toute la durée du Contrat.

#### PRINCIPE DE FONGIBILITÉ, UN PILIER POUR DIMINUER LE PRÉLÈVEMENT FONCIER

L'une des forces de BPL est d'avoir fait acter le principe de fongibilité, permettant de valoriser une même surface foncière au profit de différentes compensations, par exemple :





8

- Une zone humide et une mare peuvent ainsi être restaurées et valorisées comme habitat terrestre pour les amphibiens ;
- Une ripisylve peut être à la fois un habitat à mammifères semi-aquatiques et aussi participer au projet de renaturation d'un cours d'eau.

Ce principe permet de réduire la consommation de foncier, essentiellement agricole, ce qui représente environ 20 % de surface utile en moins.

### MÉTHODOLOGIE

Il est important de rappeler le rôle déterminant de la concertation avec toutes les parties prenantes : les services de l'État, les experts, les associations environnementales, les représentants professionnels des agriculteurs, les riverains avec notamment les Associations Départementales des Expropriés de BPL.

La méthodologie comprend trois étapes :

#### Étape 1 : la recherche des sites de compensation

À la demande de l'État, la recherche des sites de compensation s'est faite au plus proche de l'impact. Cette étape menée par ERE avec l'appui de l'ONF de 2012 à 2014 a conduit à identifier différents sites majoritairement dans les périmètres des aménagements fonciers agricoles et forestiers (AFAF) de la LGV BPL. Un travail collaboratif avec les géomètres remembreurs et les SAFER<sup>13</sup> a permis d'identifier des parcelles non nécessaires à l'équilibre des comptes des agriculteurs dans les AFAF. Après analyse écologique, les parcelles jugées éligibles pour la compensation étaient identifiées comme devant être attribuées à la SAFER en vue d'une revente à RFF. Ainsi, le taux de maîtrise foncière des mesures de compensation est d'environ 80 %. Pour chaque site potentiel de compensation, un Plan d'Aménagement et d'Orientation de Gestion (PAOG) préci-

sant l'ampleur des travaux prévus et le gain écologique attendu a été envoyé pour validation aux services de l'État (figure 10).

Lorsque l'acquisition foncière n'a pas été possible, des actions de conventionnement avec des tiers ont été engagées.

Depuis le début du projet, la gestion des futurs espaces de compensation est pensée avec les usagers du territoire : les agriculteurs. Elle passe par un conventionnement exigeant le respect de pratiques spécifiques. Ainsi, des cahiers des charges ont été réfléchis avec le monde agricole, l'État et des spécialistes de la biodiversité pour définir des pratiques conformes aux obligations de compensation d'ERE et compatibles avec une activité agricole.

#### Étape 2 : la mise en œuvre des travaux

Suite à une consultation pour la mise en œuvre, l'entretien, le suivi et l'animation du réseau de Compensation Loi sur l'Eau et Espèces Protégées durant 21 ans, ERE a confié ce marché au groupement piloté par Dervenn, acteur régional du génie écologique (Dervenn Conseil Ingénierie, Ouest Am', Cardin TP, Ter Qualitechs). Des opérations préalables (topogra-

#### 8- Mur à hironnelles de Rivage.

#### 9- Boisement compensateur à Noyal-sur-Chatillon.

#### 8- Rivage swallow wall.

#### 9- Offsetting afforestation at Noyal-sur-Chatillon.



9

FIGURE 8 © GAËL ARNAUD POUR EIFFAGE RAIL EXPRESS - FIGURE 9 © ERE (ANNE-LAURE BETHÉ)

phie, expertise terrain) ont débuté dès septembre 2014 avec un démarrage de certains travaux à l'automne 2014 (plantation, élagage d'arbres).

Le phasage des opérations de génie écologique prévoit deux campagnes de travaux au printemps-été 2015 et 2016 pour une réception des sites en mai 2017.

#### Étape 3 : le suivi, l'entretien et l'animation des sites de compensation

Jusqu'en août 2036, les sites de compensation feront l'objet d'opérations d'entretien (fauche, curage, etc.) et de suivis scientifiques pour vérifier la tenue des objectifs écologiques. Le suivi des conventionnements et le contrôle du respect des pratiques agricoles arrêtées entre ERE et les exploitants seront constants pendant toute la durée du Contrat.

### OBSERVATOIRE DE LA LGV BPL

Dans les Engagements de l'État, seul un observatoire de l'environnement était indiqué.

Dans son offre, Eiffage s'est engagé à compléter ce dispositif en élargissant le champ d'observation aux problématiques socio-économiques. Ainsi, l'observatoire mis en place depuis

le 19 juin 2012, associe l'État et les autres co-financeurs de la LGV, les représentants des territoires traversés, les acteurs économiques, les agences d'urbanisme et le monde associatif environnemental.

Ses objectifs sont de deux ordres :

**1-** Suivre et comparer des variables socio-économiques et environnementales sur la période 2012–2022,

**2-** Aller au-delà du bilan LOTI<sup>14</sup> avec quatre axes principaux :

- Partager avec les parties prenantes les connaissances acquises au travers du projet,
- Connaître les incidences locales (altération d'écosystèmes sensibles, richesses locales créées, choix publics liés au projet),
- Rendre compte des opinions publiques locales,
- Améliorer la conception et l'intégration des futurs LGV via un retour d'expérience spécifique.

Une charte de fonctionnement en date du 15 octobre 2012 précise son mode de gouvernance.

Le site [www.ere-lgv-bpl.com/observatoire](http://www.ere-lgv-bpl.com/observatoire) permet de connaître précisément l'avancée des travaux de l'observatoire et de consulter les études produites.

## SYNTHÈSE DE LA COMPENSATION AU 31/10/2014

## Compensation Boisement



214 ha

## Compensation Loi Eau



282 ha

## Compensation Espèces Protégées



453 ha

10

259 PAOG

739 ha de surface au lieu de 949 ha grâce à la fongibilité (env. 20%)

Travaux sous Maîtrise d'Ouvrage direct ERE	Travaux de mise en œuvre confiés au groupement DERVENN	
70 % de taux d'avancement pour les plantations	100 % de taux d'avancement pour les mares de compensation immédiate 2015 - 2016 Travaux dès obtention des autorisations administratives	Début des plantations fin 2014 2015 - 2016 Mise en œuvre des travaux
Fin des travaux pour le printemps 2015	Fin des travaux pour le 15 mai 2017, date de mise à disposition de la LGV BPL à RFF	

© ERE (SANDRINE CHOTARD)

## PRINCIPALES QUANTITÉS

- 9 viaducs
- 240 ouvrages d'art
- 100 buses sèches
- 16 crapauds
- 61 banquettes pour passage faune
- 160 km de haies paysagères
- 43 nichoirs pour oiseaux et chiroptères
- 214 ha de boisement compensateur
- 282 ha de compensation Loi sur l'Eau
- 453 ha de compensation espèces et habitats protégés

## MISE EN SERVICE ET APRÈS...

OPERE<sup>15</sup> continuera à participer, dans ses actions, à la politique de développement durable qui a été l'un des fils conducteurs du projet depuis l'offre et la conception jusqu'à la réalisation. Des solutions de développement durable pour la gestion des dépendances vertes de la ligne sont à l'étude comme l'éco-pâturage.

Une veille technologique sera entreprise pour rechercher dans les activités d'OPERE des méthodes et des produits plus respectueux de l'environnement. Un système de management intégré Sécurité / Qualité / Développement Durable est en cours d'établissement, et vise un an après la mise en service de la ligne l'obtention des certifications ISO 14 001 (Environnement) et 9 001 (Qualité). □

## 10- Synthèse de la compensation au 31/10/2014.

## 10- Summary of offsetting as at 31/10/2014.

- 1- **LGV BPL** : Ligne à Grande Vitesse « Bretagne Pays de la Loire ».
- 2- **Natura 2000** : Ensemble de sites naturels européens, terrestres et marins, identifiés pour la rareté ou la fragilité des espèces sauvages, animales ou végétales, et de leurs habitats.
- 3- **ZNIEFF** : Zone Naturelle d'Intérêt Faunistique et Floristique.
- 4- **ONF** : Office National des Forêts.

- 5- **FIPAN** : Fonds d'Intervention pour le Patrimoine Naturel. Démarche créée par l'association éponyme permettant la mutualisation de moyens techniques et financiers pour la gestion des écosystèmes et la maintenance des services écologiques sur des territoires nécessitant une reconquête de biodiversité (pour plus d'information : [www.fipan.fr](http://www.fipan.fr)).
- 6- **CNPN** : Conseil National de la Protection de la Nature.
- 7- **DREAL** : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement.
- 8- **DDT** : Direction Départementale des Territoires.
- 9- **ONEMA** : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques.
- 10- **ONCFS** : Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage.
- 11- **CLERE** : Constructeur de la Ligne Eiffage Rail Express.
- 12- **Modul'AP** : Module d'assainissement provisoire, créé par Forézienne d'Entreprises (Eiffage Travaux Publics).
- 13- **SAFER** : Société d'Aménagement Foncier et d'Établissement Rural.
- 14- **LOTI** : Loi d'Orientations des Transports Intérieurs.
- 15- **OPERE** : OPérateur pour la ligne Eiffage Rail Express.

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

- **RFF**
- **TITULAIRE DU CONTRAT DE PARTENARIAT : ERE**
- **CONSTRUCTEUR : CLERE**
- **MAÎTRE D'ŒUVRE : Setec/Ingerop**
- **PRESTATAIRES SUR LES SUJETS DÉVELOPPEMENT DURABLE : Asconit, Dervenn, Gaiadomo, Géoarmor, Grege, Hydroconcept, Kaliès, Ligue de Protection des Oiseaux de la Sarthe, Mayenne Nature et Environnement, Nicolas Moulin entomologue, Objectif Carbone, ONF, Ouest am', Socotec**

## ABSTRACT

### BPL HSL: A TEXTBOOK CASE OF APPLICATION OF THE ENVIRONMENTAL APPROACH: "PREVENT, REDUCE AND OFFSET"

S. CHOTARD, EIFFAGE (ERE) - L. FREMONDIÈRE, SETEC - L. PETIT, EIFFAGE (CLERE)

The Brittany/Pays-de-la-Loire High-Speed Rail Line contributes to the sustainable development of the regions passed through. In its technical design of the route, Réseau Ferré de France took into account the environmental implications for the environments encountered. Eiffage Rail Express (ERE) and Constructeur de la Ligne Eiffage Rail Express (CLERE) refined this environmental design with the government, local associations and scientific experts. The work in progress is carried out with respect for the natural and human environment, giving priority to the hiring of local personnel. The principles of the doctrine "Prevent, Reduce and Offset" impacts on the natural environment are followed by ERE to make the BPL HSL a textbook case. □

### LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD BURDEOS-PAÍSES DEL LOIRA (LGV BPL): CASO DE LIBRO DE LA APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO AMBIENTAL "EVITAR, REDUCIR Y COMPENSAR"

S. CHOTARD, EIFFAGE (ERE) - L. FREMONDIÈRE, SETEC - L. PETIT, EIFFAGE (CLERE)

La línea de alta velocidad Breñaña-Países del Loira contribuye al desarrollo sostenible de los territorios por los que pasa. En la definición técnica del trazado, Réseau Ferré de France integró los retos ambientales de los medios encontrados. Eiffage Rail Express (ERE) y el Constructeur de la Ligne Eiffage Rail Express (CLERE) ultimaron este diseño ambiental con el Estado, las asociaciones locales y expertos científicos. En las obras que se están realizando se respeta el entorno natural y humano, y se da prioridad a la contratación de personal local. ERE sigue los principios de la doctrina "Evitar, Reducir y Compensar" los impactos sobre el medio natural para convertir la LGV BPL en un caso de libro. □





1

© ETP AMMAR TRICHE

# LA SOLUTION GRAVE-BITUME SOUS BALLAST APPLIQUÉE AU PROJET DE LGV BRETAGNE - PAYS-DE-LA-LOIRE

AUTEURS : AMMAR TRICHE, DIRECTEUR TECHNIQUE, EIFFAGE TP, ÉTABLISSEMENT GRANDS TRAVAUX ENROBÉS - PASCAL DOS SANTOS, RESPONSABLE D'EXPLOITATION, EIFFAGE TP, ÉTABLISSEMENT GRANDS TRAVAUX ENROBÉS - OLIVIER PRINET, DIRECTION DE PROJET ST1 EIFFAGE TP

LA CONSTRUCTION PAR EIFFAGE DE LA PLATE-FORME FERROVIAIRE DE LA LGV BPL A FAIT L'OBJET D'UNE SOLUTION INNOVANTE TANT PAR SA CONCEPTION QUE PAR SA RÉALISATION. LA STRUCTURE CLASSIQUE AVEC UNE SOUS-COUCHE FERROVIAIRE EN GRAVE NON TRAITÉE (GNT) EST REMPLACÉE PAR UNE SOLUTION INCLUANT UNE COUCHE EN GRAVE-BITUME (GB) SOUS LE BALLAST. CETTE SOLUTION, INITIÉE PAR RFF SUR LA LIGNE LGV-EST PREMIÈRE PHASE A ÉTÉ INTÉGRÉE DANS SON RÉFÉRENTIEL ET APPLIQUÉE, À DIVERS DEGRÉS, SUR TOUS LES PROJETS ACTUELS DE LIGNE À GRANDE VITESSE. SUR BPL, ELLE EST MISE EN ŒUVRE SUR 105 KM.

## DONNÉES DU PROJET

En termes de plates-formes ferroviaires, le projet BPL est divisé en deux types distincts : une solution dite classique (tout granulaire) et une autre avec la sous-couche en grave-bitume.

Concrètement, la sous-couche ferroviaire est réalisée en matériaux granulaires sur les 77 km à l'ouest du tracé (TOARC A, B et C) et en grave bitume sur les 105 km à l'est du tracé (TOARC D à G).

La proximité de gisements de matériaux granulaires de très bonne qualité sur la partie ouest du tracé a en effet justifié sur un plan économique le recours à la solution classique et non à la solution avec GB.

La structure mise en œuvre est composée, de bas en haut (figure 2) :

## LES PRINCIPALES DONNÉES DU PROJET, CONCERNANT LA SOUS-COUCHE EN GB

**LINÉAIRE TOTAL DE LA SOLUTION EN GB4 : 105 km**

**DURÉE DU CHANTIER : 16 mois**

**ENROBÉS (GB4) : 250 000 t**

**BITUME (35/50) : 12 000 t de bitume**

**GRAVE NON TRAITÉE (GNT) : 750 000 t**

**COUCHE D'IMPRÉGNATION MONOCOUCHE : 1 660 000 m<sup>2</sup>**

**COUCHE D'IMPRÉGNATION BICOUCHE : 600 000 m<sup>2</sup>**

**CENTRALE D'ENROBAGE : TSM 25 Major de marque Ermont (capacité 450 t/h)**

**FINISSEURS : Volvo ABG 525 avec tables grandes largeurs, Voegle super 1800 ou 1900**

**COMPACTEURS : Hamm HD120 ou HD130**

- D'une PST traitée à la chaux et aux liants hydrauliques (PST : Partie supérieure des Terrassements) ;
  - D'une couche de réglage en GNT (Grave Non Traitée) ;
  - D'une sous-couche en grave-bitume ;
  - D'un accotement en GNT de part et d'autre de la GB ;
  - D'un enduit sur la GB et la GNT d'accotement, offrant ainsi au ballast une surface d'appui homogène. Des enduits monocouches et bicouches sont également mis en œuvre sur la PST et la GNT. Le ballast et les équipements ferroviaires viennent compléter le système.
- Voir l'encadré pour le résumé des principales données du projet, concernant la sous-couche en GB.

© ETP



**CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DE LA PLATE-FORME**

Le dimensionnement mécanique de la structure ferroviaire de BPL a été réalisé selon la méthode française de dimensionnement<sup>1</sup> des structures de chaussée, adaptée au contexte particulier de la voie ferrée. C'est une méthode rationnelle de calcul des structures routières, dite « probabiliste », fondée à la fois sur les caractéristiques des matériaux validées en laboratoire et sur un grand nombre de mesures en grandeur réelle effectuées sur site.

Le modèle mécanique retenu, ainsi que les hypothèses de calcul ont bénéficié du recul apporté par l'expérience de la LGV-Est européenne et des expériences internationales (Italie, Allemagne, Espagne, ...). Ces hypothèses sont conformes au guide de conception et de dimensionnement<sup>1</sup> ainsi qu'au guide de construction des chaussées<sup>2</sup> pour

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX

Matériaux	Module E (MPa)	Coefficient de Poisson (ν)
Ballast	200	0.4
Grave-bitume Classe 4 (GB4)	11 000	0.35
Sous-couche GNT	240 (3xEsol)	0.35
Sol	80	0.35

- 1- Vue compactage GB4.
- 2- Principe de la sous-couche ferroviaire en grave-bitume.

- 1- View of GB4 compaction.
- 2- Principle of the rail sub-base in bitumen-graded aggregate.

la plate-forme, la GNT de réglage et la grave-bitume. Les différentes hypothèses retenues sont synthétisées dans le tableau 1. Pour le ballast, il a été assimilé à un matériau continu, homogène et isotrope dont les caractéristiques sont données dans le tableau 1 également. Ceci est confirmé par divers travaux de recherche récents sur le sujet<sup>3</sup>. Les charges roulantes (trains) et leur nombre cumulé, sur la durée de vie de la structure, ont été pris en compte

en conformité avec l'étude de trafic du projet.

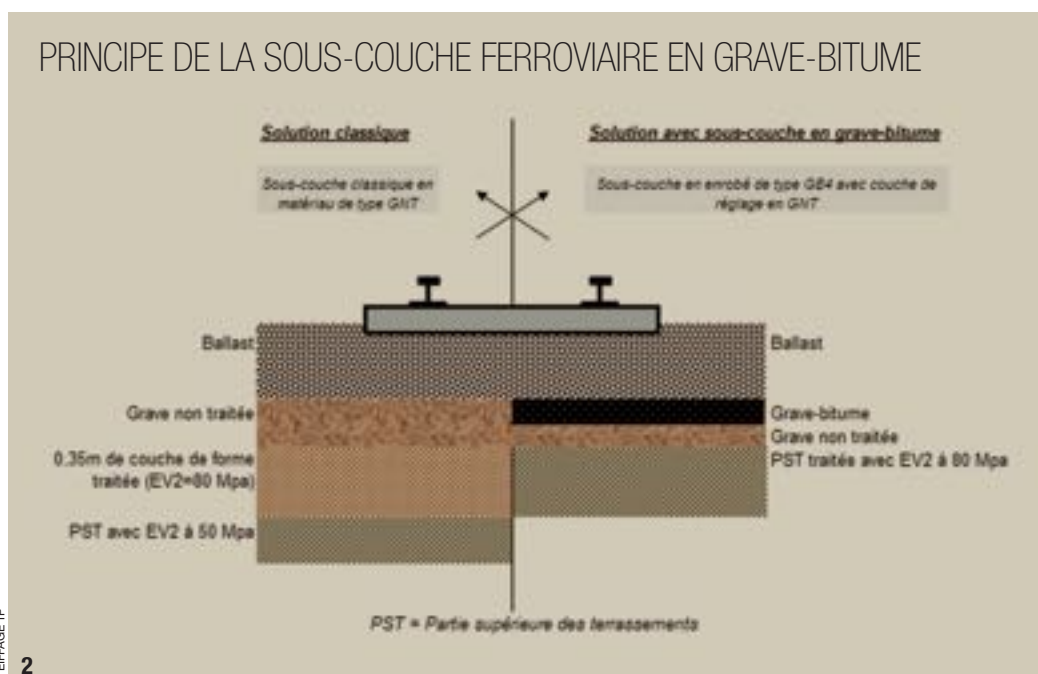
Les calculs ont été menés avec le logiciel Alizé®, couramment utilisé en technique routière.

Pour la structure de la figure 2, en ce qui concerne les contraintes verticales au sommet de la PST, les valeurs calculées avec la couche de GB sont inférieures à celles de la structure sans GB, ce qui est normal compte tenu de la rigidité de la couche de GB, ce qui correspond à une meilleure diffusion des charges sur la PST.

Les valeurs de l'élongation à la base de la GB sont à comparer aux valeurs admissibles du matériau. Le niveau de sollicitation, comparé aux références routières usuelles, est faible. La couche de grave-bitume est peu sollicitée en flexion.

Les calculs ont montré que l'endommagement de la GB, qui correspond au cumul des dommages en fatigue sur la période (répétition des charges), pour chaque section, est inférieur à 100%. Les calculs prennent également en compte l'endommagement subi en phase travaux, dû à la circulation de chantier.

Une vérification du comportement de la structure a été réalisée à l'aide d'outils basés sur les calculs aux éléments finis (logiciel Comsol Multiphysics). Elle a permis en particulier de calculer le niveau de sollicitation à la base de la couche de GB4 et ainsi de la comparer aux résultats obtenus à l'aide du logiciel Alizé. Cette méthode aux éléments finis (EF) présente un intérêt tout particulier pour le calcul d'infrastructures à géométrie discontinue telles que les structures ferroviaires. Cette méthode a déjà montré ses capacités pour le calcul d'autres structures : plates-formes de tramways ou couches de chaussées sur dalle orthotrope comme c'est le cas sur le viaduc de Millau.





Par ailleurs, la possibilité de prendre en compte le comportement visqueux des matériaux bitumineux dans les calculs présente également un intérêt dans le cas des structures de LGV avec GB sous ballast. Cela permettra, à terme, de proposer une méthode adaptée au système ferroviaire.

Les résultats des calculs aux éléments finis valident les hypothèses prises en compte, que ce soit au niveau du comportement mécanique de la GB ou de la répartition des charges sur les traverses au passage d'un essieu. L'apport de la couche de GB sur le comportement de la structure a également pu être quantifié, celle-ci permet une diminution des sollicitations verticales en tête de plate-forme avec la sous-couche en GB.

Un exemple de déformation transversale au passage d'un essieu est montré sur la figure 4.

#### LA FORMULATION DE LA GB4

Les prescriptions relatives aux caractéristiques de la GB sont définies dans le cahier des charges « spécifications techniques détaillées (STD) » des terrassements de la plate-forme.

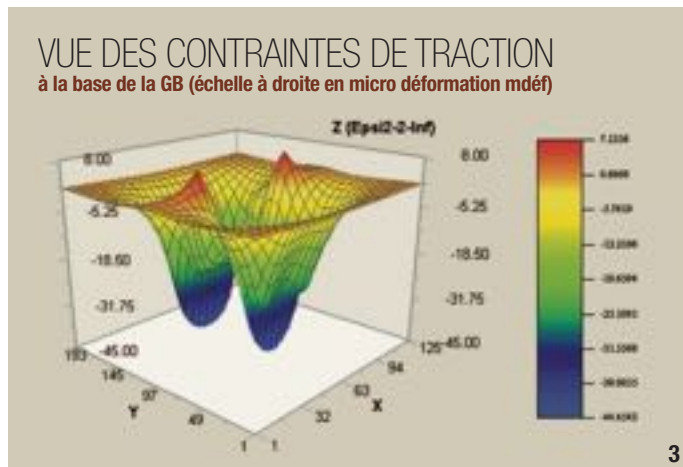
Au stade de la conception et du dimensionnement, le choix s'est porté sur une grave-bitume de classe 4 au sens de la norme européenne NF EN 13108-1. Ce matériau offre les garanties nécessaires de durabilité recherchées par le projet (durée de vie de 100 ans).

Ce type de matériau a l'avantage de bénéficier, au niveau de son comportement sur site, d'un retour d'expérience d'une quarantaine d'années sur le réseau autoroutier français où il est soumis à des charges beaucoup plus agressives que sous trafic ferroviaire. Les critères de la norme ont été complétés par des spécifications particulières sur la GB4 relatives à la durée de vie de la structure relativement longue (module de richesse de la GB4, taux de compactage).

L'étude de formulation de la GB4 a été réalisée par le Laboratoire Central d'Études Travaux Publics de Ciry-Salsogne, près de Soissons. L'étude a pour objectif de valider un mélange conforme à la norme NF EN 13108-1 qui fixe les caractéristiques minimales à respecter pour une GB de classe 4.

Les essais à réaliser correspondent à une formulation de niveau 4, correspondant aux essais suivants :

- La mesure de la masse volumique réelle de l'enrobé MVR (norme NF EN 12697-5) ;
- La maniabilité du matériau ou essai PCG (norme NF EN 12697-31) ;



- La sensibilité à l'eau (ex-essai Duriez) (norme NF EN 12697-12) ;
- La résistance à l'orniérage (norme NF EN 12697-22) ;
- Le module de rigidité (norme NF EN 12697-26) ;
- La résistance à la fatigue (norme NF EN 12697-24).

Les essais les plus importants, pour une grave-bitume ferroviaire, sont la sensibilité à l'eau qui valide la compatibilité bitume-granulat directement liée à la durabilité du matériau, les essais de module de rigidité et de résistance en fatigue qui valident les hypothèses de dimensionnement retenues dans le modèle de calcul.

Plusieurs combinaisons de mélange ont dû être testées avant d'obtenir la formule optimale qui permet d'obtenir sur chantier un matériau dense avec une compacité élevée, gage d'une durabilité optimale. Pour le mélange retenu, les valeurs mesurées sont conformes aux spécifications des STD et de la norme

**3- Vue des contraintes de traction à la base de la GB (échelle à droite en micro déformation mdéf).**

**4- Exemple de déformation transversale de la structure au passage d'un essieu.**

**3- View of tensile stresses at the base of the bitumen-bound graded aggregate (right-hand scale in micro-deformation mdéf).**

**4- Example of transverse deformation of the structure passed over by an axle.**

NF EN 13108-1. Les tableaux 2 et 3 synthétisent les résultats obtenus ainsi que le détail de la formule.

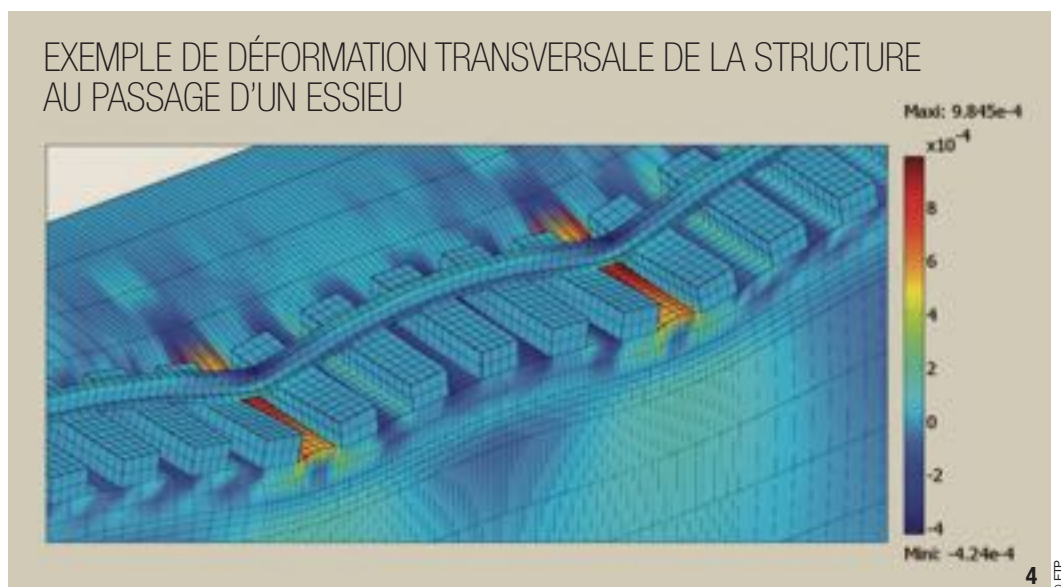
Avant le démarrage des travaux, une épreuve de convenance a été réalisée afin de vérifier que la centrale d'enrobage pouvait fabriquer le mélange défini lors de l'étude aux incertitudes usuelles près. Cette épreuve de convenance a été complétée par une planche d'essai et une planche de référence pour définir et valider les réglages de fabrication et de mise en œuvre.

#### CHOIX DES GRANULATS ET BITUME POUR LA GB4

La carrière retenue pour l'élaboration de la GB4 est la carrière d'Averton, distante de 50 km du chantier ; elle produit des granulats de type roches massives. Elle exploite un gisement de volcanoclastites et de laves acides, essentiellement de la rhyolite, daté du Cambrien (Paléozoïque).

Elle produira au total 250 000 t de matériaux pour le chantier. Une organisation spécifique a été mise en place, en coordination avec la carrière, pour produire et contrôler des coupures granulaires conformes au cahier des charges (fuseau, essai Los Angeles LA, essai micro-Deval humide MDE, fine, ...). Le détail des matériaux produits est résumé dans les tableaux 4 et 5. Cette carrière a été retenue car elle satisfait au cahier des charges et a l'habitude de fournir ce type de matériau aux entreprises de travaux publics locales.

Le bitume, de grade 35/50, provient de la raffinerie de Total à Donges. Il s'agit du même bitume que dans l'étude de formulation.



## FABRICATION DE LA GB4

Le choix de l'entreprise s'est porté sur une centrale d'enrobage continue de type TSM 25 Major (de marque Ermont) appartenant à son parc matériel. Celle-ci a été acheminée sur le site de Saint-Georges-le-Fléchard, à proximité du tracé du chantier par convoi exceptionnel.

L'intérêt de disposer d'un tel outil réside dans sa capacité de production élevée (jusqu'à 450 t/h) et la maîtrise du produit fabriqué (un seul type d'enrobés à la fois). Elle peut ainsi fabriquer en continu un même matériau à des cadences que des centrales fixes ne peuvent atteindre, avec une qualité accrue.

Ces centrales sont utilisées en priorité sur des grands projets comme les autoroutes, les aéroports et les grandes infrastructures.

Avant de pouvoir utiliser cette centrale, Eiffage TP - GTE a déposé un dossier spécifique d'autorisation d'Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). Celui-ci a été instruit auprès de la DREAL (directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement) afin de valider le processus de fabrication et de fixer les règles d'exploitation de cet outil, en conformité avec la réglementation en vigueur.

Après plusieurs essais réalisés par des organismes spécialisés dans le domaine des ICPE, les autorités compétentes ont donné leur aval pour la mise en production. Cette autorisation est valable six mois, renouvelable une seule fois. Au cours des travaux, d'autres essais et contrôles sont prévus à intervalles réguliers définis dans l'autorisation.

Afin de garantir une qualité de fabrication constante de la GB4 et faciliter le pilotage de la centrale, celle-ci est équipée d'un dispositif de contrôle interne permettant de contrôler en permanence la fabrication du matériau. Elle est munie pour cela d'un logiciel de pilotage dénommé Tenor.

Outre le système de contrôle intégré Tenor, toutes les phases d'approvisionnement des matériaux et de production font l'objet d'un contrôle interne et externe d'Eiffage TP - GTE permettant de garantir au chantier un produit conforme au cahier des charges.

## CHOIX DES GRANULATS POUR LA COUCHE DE RÉGLAGE EN GRAVE NON TRAITÉE (GNT)

Comme indiqué en figure 2, la GB4 repose directement sur une couche

TABLEAU 2 : FORMULE RETENUE

Formule ENi13_237 : GB4 0/14 (Appellation européenne : EB 14 Assise 35/50)		NF EN 13108-1
0/2 Baglione	28,1%	-
2/6 Baglione	10%	-
6/10 Baglione	12%	-
10/14 Baglione	41,7%	-
Filler Haut-Lieu	3,4%	-
Bitume 35/50 TOTAL Donges	4,8%	-

TABLEAU 3 : RÉSULTATS DE L'ÉTUDE DE FORMULATION

	Formule ENi13_237 : GB4 0/14		NF EN 13108-1 (4)
Recomposition granulométrique	Passant à 6,3 mm	43,8%	-
	Passant à 2 mm	32,2%	10 à 50%
	Passant à 0,063 mm	7,6%	0 à 12%
	Module de richesse K	3,01	-
	MVRg	2,664 Mg/m <sup>3</sup>	-
	MVRe	2,476 Mg/m <sup>3</sup>	-
Maniabilité PCG (6) (NF EN 12697-31)	10 girations	14,7% de vides	> 14%
	100 girations	5,2% de vides	< 9%
Sensibilité à l'eau (7) (NF EN 12697-12)	Résistance CW	-	-
	(7 jours à 18 °C dans l'eau)	8 898 kPa	-
	Résistance CD	-	-
	(7 jours à 18 °C dans l'air)	10 221 kPa	-
	Rapport i/C	87%	> 70%
ORNIERAGE (8) (NF EN 12697-22+A1)	Ornière à 30 000 cycles (60 °C)	4,3%	< 10,0%
MODULE (9) (NF EN 12697-26 - E)	Module sécant (0,02 s et 15 °C)	12 700 MPa	≥ 11 000 MPa
FATIGUE (10) (NF EN 12697-24 - A)	ε6 (25 Hz et 10 °C)	100 µdef	≥ 100 µdef

TABLEAU 4 : CARACTÉRISTIQUES DES GRAVILLONS

Coupure	Nature	Coefficient LA	Coefficient MDE	Aplatissement FI	Classification selon (5)
Gravillon 2/6	Rhyolite	18	9	21	B III
Gravillon 6/10				14	
Gravillon 10/14				9	

TABLEAU 5 : CARACTÉRISTIQUES DU SABLE

Coupure	Nature	Masse au bleu MB	Granulométrie	Classification selon (5)
Sable 0/2	Rhyolite	1.2	G <sub>F85</sub> et G <sub>Tc10</sub>	A

TABLEAU 6 : CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTES GNT

Origine / carrière	Coupure	Nature	Coefficient LA	Coefficient MDE	Aplatissement FI
St-George-le-Fléchard (53)	0/20	Porphyre	18	9	11
Averton (53)		Rhyolite	21	13	21
Vaiges (53)		Calcaire	25	15	15
Entrammes (53)		Schiste grésifié	24	15	22
Voutré (53)	0/20	Rhyolite	19	20	13

de réglage en GNT. La réalisation de cette couche est aussi stratégique que la GB4 car elle protège la PST, constitue l'assise de la GB4 et va déterminer la pente finale de la GB4. Elle doit également résister à la circulation de chantier et aux éventuelles intempéries météorologiques sans subir aucune dégradation.

La GNT est de granulométrie 0/D avec  $D \leq 31,5$  mm. Ce choix de granulométrie est en relation étroite avec le mode de mise en œuvre au finisseur. Des essais de faisabilité ont été réalisés avant démarrage des travaux avec plusieurs origines et plusieurs coupures de matériaux (0/20 et 0/31.5). Les matériaux retenus et ayant donné satisfaction sont indiqués dans le tableau 6. Au vu du tonnage relativement important (750 000 t), Eiffage TP - Gte a diversifié son approvisionnement : 4 carrières ont été retenues pour la qualité de leur matériaux, conformes aux spécifications techniques et en fonction des essais de faisabilité de mise en œuvre au finisseur.

Les spécifications techniques de Réseau Ferré de France (RFF), reprises dans les STD du projet, imposent une courbe granulométrique et des caractéristiques mécaniques relativement strictes.

Des contrôles renforcés ont été mis en place au niveau des carrières pour garantir la fourniture de produits conformes aux STD et éviter de gérer des matériaux non-conformes sur chantier.

L'objectif de chaque carrière est de disposer d'au moins 50% de la commande en stock avant démarrage des travaux.

Les GNT sont humidifiées à la teneur en eau optimale en carrières, cela permet d'éviter l'arrosage approximatif de chantier. Néanmoins, un système d'arrosage a été installé sur les finisseurs, celui-ci est prévu pour apporter une correction de teneur en eau de 1% maxi sur chantier (figure 6).

## MISE EN ŒUVRE DE LA GRAVE NON TRAITÉE (GNT) ET DE LA GB4

La mise en œuvre de la GNT se fait à l'aide d'un finisseur « grande largeur » de type Volvo ABG 525 sur toute la largeur de la plate-forme, soit près de 14 m (figure 17). Ce matériel, monté avec une table en grande largeur, est normalement utilisé pour les travaux de couches d'enrobés sur routes de grande envergure à plusieurs voies de circulation.



Eiffage TP - GTE a opté pour ce matériel car les objectifs altimétriques sont très exigeants pour ce type de matériau. En effet, le nivellement de la couche de GNT, doit être compris entre 0 cm et - 2 cm par rapport au projet théorique. Ce matériel permet également d'avoir, en sortie derrière la table du finisseur, un matériau pré-compacté et déjà nivelé au compactage du matériau près.

Les travaux d'accotements, en GNT, sont réalisés avec des finisseurs plus petits, de type Voegelé Super 1800 ou Super 1900 (figure 8).

La GB4 est également mise en œuvre à l'aide d'un finisseur « grande largeur » de type Volvo ABG 525 muni d'une table à haut pouvoir de compactage (figure 9). La table est montée en 8 m de large correspondant à la largeur de la GB4 à mettre en œuvre. Le finisseur est guidé par DPS (guidage 3D par GPS), pour répondre également aux spécifications altimétriques et d'épaisseurs très strictes sur la couche de GB4 (altimétrie : +/- 1 cm par rapport au projet théorique ; épaisseur : 100% des points  $\geq$  12 cm).

S'agissant de GB4 ou de GNT, le compactage des matériaux est réalisé par des compacteurs vibrants de type Hamm HD 120 ou HD 130. Le compacteur à pneus est réservé à la ferme-

ture de la surface de la GNT (figure 10). La mise en œuvre des couches d'enduit sur la GNT, la GB et les accotements est assurée par une épanduse à liant Rincheval de l'établissement Grands Travaux Enrobés.

Pour chaque configuration du linéaire et chaque matériau (GNT ou GB4), des planches d'essais et de référence permettent de valider le nombre de passes à réaliser pour avoir une qualité de compactage homogène sur tout le profil.

La vérification et le contrôle du matériel est assuré par le service dédié du chantier qui vérifie l'état général du matériel après transfert et le bon fonctionnement de tous les organes des différentes machines.

#### LES ENJEUX DU PLANNING

La réussite de la livraison de la plateforme ferroviaire aux équipes de « voies ferrées » et « caténaires - électrification » repose sur des enjeux identifiés



5

© ETP

**5- Carrière de St-Georges Le Flécharde (production de la GNT 0/20).**

**6- Vue système d'arrosage GNT sur finisseur.**

**7- Mise en œuvre GNT grande largeur.**

**8- Mise en œuvre GNT en accotement.**

**9- Mise en œuvre GB4.**

**5- St-Georges Le Flécharde quarry (production of 0/20 untreated graded aggregate).**

**6- View of untreated graded aggregate spraying system on paving machine.**

**7- Large-width placing of untreated graded aggregate.**

**8- Placing untreated graded aggregate on road shoulder.**

**9- Placing GB4.**

dès le démarrage des travaux. Ceux-ci sont au nombre de deux et correspondent aux délais suivants :

→ Livrer la zone Ouest du projet, correspondant au linéaire compris entre le Pk 63.0 et le Pk 105.5, soit 42,5 km entre août et septembre 2014. Cette zone correspond aux TOARC D et E ouest ;

→ Livrer la zone Est du projet, correspondant au linéaire compris entre le Pk 1 et le Pk 63, soit 63 km entre mars et juin 2015. Cette zone correspond aux TOARC E est, F et G.

La zone Ouest a été livrée dans les délais aux équipes « équipements ferroviaires et électrification de la voie » pour le démarrage de leurs travaux grâce à une mobilisation importante durant l'été 2014, avec des cadences moyennes de productions journalières de 6 000 t et pouvant aller certains jours jusqu'à 8 000 t (GB4+GNT).

Pour la zone Est, en cours de réalisation (GNT et GB4) l'objectif principal



6



7

© ETP AMMAR TRICHE



8



9

© ETP AMMAR TRICHE

consiste à recouvrir les zones de PST traitées avant l'hiver avec la couche de réglage et de GB4 afin d'en assurer la protection vis-à-vis du phénomène de gel-dégel. Pour cela, Eiffage TP-Gte a mobilisé du personnel polyvalent pouvant, sans distinction, passer d'un atelier d'enrobé à un atelier de de GNT, au fur et à mesure des libérations des zones de PST par les terrassiers. Les moyens en matériel mobilisés sont importants : 2 ateliers de couche de réglage grande largeur (14 m) avec 2 alimentateurs, 2 ateliers d'accotement avec des finisseurs montés en 3 m de large, 1 atelier de GB4 avec un finisseur monté en 8 m de large, ainsi qu'une flotte d'environ 60 semis. Ces moyens permettent de garantir une cadence moyenne de 6 000 t/j. Au besoin, Eiffage TP-Gte est capable de réaliser jusqu'à 9 000 t/j en pointe (GNT+GB4) pour tenir les délais.

## LES CONTRÔLES

Le chantier dispose d'un laboratoire de contrôle sur place, complètement dédié au chantier, avec tout le matériel nécessaire pour contrôler les constituants, la fabrication et la mise en œuvre.

Les essais suivants peuvent être réalisés sur place :

- Contrôle des bitumes : mesure de viscosité, température bille et anneau, pénétrabilité ;
- Contrôle des granulats : granulométrie, aplatissement, masse de bleu ;
- Contrôle de la PST : mesure de déformabilité à la plaque (module EV2), mesure du module à la dynaplaque ;
- Contrôle des enrobés : teneur en bitume (méthode de Rouen), carottages, mesure de compacité au Troxler (figure 11).

Un responsable du contrôle externe d'Eiffage TP-Gte est présent en per-



10

11

© ETP AMMAR TRICHE

**10- Compactage GNT.**

**11- Essai gamma-densimètre sur GB4.**

**10- Compaction of untreated graded aggregate.**

**11- Gamma-densimeter test on GB4.**

manence pendant la durée des travaux. Il est assisté d'une dizaine de techniciens. Si nécessaire, la direction technique d'Eiffage TP peut intervenir en renfort au travers des laboratoires

centraux ou d'experts pour des points particuliers ou des audits.

L'organisation mise en place pour la réalisation de la GB4 et de la GNT de réglage est un Plan d'Assurance Qualité (PAQ) de type C avec contrôle intérieur et extérieur. La maîtrise d'œuvre (Setec) et son contrôle extérieur disposent également sur place des moyens nécessaires pour vérifier tous les matériaux et toutes les phases du projet.

Elle s'appuie aussi sur des experts et laboratoires internes à son organisation.

## CONCLUSION

Eiffage met en œuvre sur le projet BPL une solution technique innovante, en accord avec RFF : la grave-bitume sous ballast. Cette structure a été dimen-

sionnée avec un logiciel utilisé dans le domaine routier et doublé par des calculs aux éléments finis. La méthode et le modèle mécanique ont été adaptés à la spécificité de la voie ferrée et bénéficient du retour d'expérience de la LGV Est.

Cette innovation, issue d'une expérimentation réalisée par RFF/SNCF sur la ligne à grande vitesse est-européenne en 2007, fait dorénavant partie du référentiel technique de RFF au même titre que la solution classique en matériaux granulaires. Cette technique a été retenue sur les 3 lignes LGV actuellement en construction avec divers degrés d'importance. Sur BPL, elle est appliquée sur environ 105 km de voie à grande vitesse.

Eiffage TP-Gte, filiale d'Eiffage TP et spécialisée dans la réalisation des grandes infrastructures linéaires a la charge de réaliser les 105 km de GB4. Ceci permet de garantir une interface simplifiée avec un seul acteur, une régularité de réalisation ainsi que des contrôles optimisés.

Eiffage TP-Gte peut également compter sur des équipes polyvalentes qui assurent à la fois la mise en œuvre de la GNT et de la GB4. Les zones de PST livrées par le terrassier doivent être recouvertes par la GNT et la GB4 au plus vite les zones de PST afin d'en assurer la pérennité.

Les deux enjeux liés à la tenue du planning général de livraison des plates-formes sont, pour l'instant, en passe d'être maîtrisés. □

1- Guide technique - conception et dimensionnement des structures de chaussées SETRA-LCPC, décembre 1994.

2- Construction des chaussées neuves sur le réseau national - Spécification des variantes SETRA - Mars 2003.

3- Analyse des déformations permanentes des voies ferrées ballastées, approche dynamique Ali Al Shaer, Thèse de doctorat ENPC, 2006.

## ABSTRACT

### **BITUMEN-BOUND GRADED AGGREGATE UNDER BALLAST SOLUTION APPLIED TO THE BRITTANY/PAYS-DE-LA-LOIRE HSL PROJECT**

EIFFAGE TP: AMMAR TRICHE, PASCAL DOS SANTOS, OLIVIER PRINET

**For construction of the Brittany/Pays-de-la-Loire HSL rail transport platform, Eiffage employed an innovative solution for both design and execution. This involved replacing the conventional structure comprising a rail sub-base in untreated graded aggregate with a layer of bitumen-bound graded aggregate under the ballast. This structure was sized with a software used in the highway engineering sector backed up by finite-element calculations. The bitumen-bound graded aggregate solution, initiated by RFF on the first phase of the East European High-Speed Train Line, has been included in its reference database. It is applied, to varying degrees, on all current high-speed rail line projects. On BPL, this technique is applied over 105 km. □**

### **LA SOLUCIÓN GRAVA-BETÚN BAJO BALASTO APLICADA AL PROYECTO DE LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD BRETAÑA-PAÍSES DEL LOIRA**

EIFFAGE TP: AMMAR TRICHE, PASCAL DOS SANTOS, OLIVIER PRINET

**La construcción por Eiffage de la plataforma ferroviaria de la línea de alta velocidad Bretaña-Países del Loira ha sido objeto de una innovadora solución tanto por su diseño como por su realización. Consiste en sustituir la estructura convencional que incluye una subcapa ferroviaria de grava no tratada (GNT) por una capa de grava-betún (GB) bajo el balasto. Esta estructura se ha dimensionado con un software utilizado en el ámbito de las carreteras y acompañado de cálculos con los elementos acabados. La solución grava-betún, iniciada por RFF en la primera fase de línea de alta velocidad, se ha integrado en su referencial. Se aplica, en diferentes grados, en todos los proyectos actuales de línea de alta velocidad. En Bretaña - Países del Loira, esta técnica se aplica en 105 km. □**





1

© Oc'Via

# LE CNM : UNE CONCEPTION ÉTROITEMENT LIÉE À LA MIXITÉ ET AU CONTEXTE HYDRAULIQUE

AUTEURS : AGNÈS ROUSSEAU, RESPONSABLE COMMUNICATION, OC'VIA - DOMINIQUE REGALLET, DIRECTEUR TECHNIQUE INFRA D'OC'VIA CONSTRUCTION, BOUYGUES TP - JIMENA NICOSIA, RESPONSABLE DE LA MOEP INFRA POUR LE LOT HÉRAULT, SYSTRA - FABRICE DROUIN, DIRECTEUR DE LA MOE, SYSTRA

**LE CONTOURNEMENT DE NÎMES ET MONTPELLIER (CNM) EST UNE LIGNE NOUVELLE DONT LA CONCEPTION A ÉTÉ GUIDÉE PAR DEUX CONTRAINTES MAJEURES : UN CONTEXTE HYDRAULIQUE PARTICULIÈREMENT SENSIBLE, NOTAMMENT DES PLAINES INONDABLES - LA MIXITÉ, QUI REQUIERT UN PROFIL EN LONG ET UN TRACÉ COMPATIBLES AVEC LA TRÈS GRANDE VITESSE ET LE FRET.**

## NÎMES - MONTPELLIER : UN TRONÇON SATURÉ

La finalité première du Contournement de Nîmes et Montpellier (CNM) est l'augmentation de la capacité de circulation en nombre de trains sur l'axe languedocien. En effet, depuis la mise en service de la LGV Méditerranée en juin 2001, la ligne actuelle, qui relie les deux principales agglomérations régionales, est saturée. Cette saturation ne permet pas, en particulier, de tirer tous les bénéfices de la ligne nouvelle à Grande Vitesse franco-espagnole Perpignan - Figueras, ouverte en 2010, et prolongée jusqu'à Barcelone fin 2013. Compte tenu du caractère incontournable de la ligne actuelle entre Nîmes et Montpellier, qui est le seul réseau ferroviaire existant sur l'axe languedocien, la congestion du réseau ferroviaire ne peut être résorbée qu'avec la création

d'une nouvelle infrastructure : le CNM. Cette ligne nouvelle est une ligne mixte Grande Vitesse / Fret, qui permettra ainsi de répondre à trois objectifs :

- Augmenter de façon significative la capacité : +50% de trafic de TER sur la ligne actuelle entre Nîmes et Montpellier ;
- Permettre un report significatif du fret de la route vers le rail (10 millions de tonnes/an potentiellement), et contribuer ainsi à désaturer le trafic routier ;
- Réduire à 3h la durée du trajet Paris Montpellier pour les voyageurs, avec la Grande Vitesse.

## DE LA DUP AU PPP

Cinq ans d'études menées par Réseau Ferré de France ont permis d'aboutir à la déclaration d'utilité publique du CNM, le 17 mai 2005.

## 1- Ligne TGV.

## 1- HST line.

Après un programme d'études complémentaires pour élaborer l'Avant-Projet Sommaire, RFF a confié la maîtrise d'ouvrage du projet à Oc'Via en juillet 2012, par la signature d'un contrat de Partenariat Public Privé de 25 ans pour financer, concevoir, construire et entretenir la ligne nouvelle jusqu'en 2037 (figure 2).

## LA PREMIÈRE LIGNE MIXTE EN FRANCE

Le caractère mixte Grande Vitesse/Fret du CNM est une première sur notre territoire.

## LES PRINCIPAUX OBJECTIFS DE LA MIXITÉ DU CNM

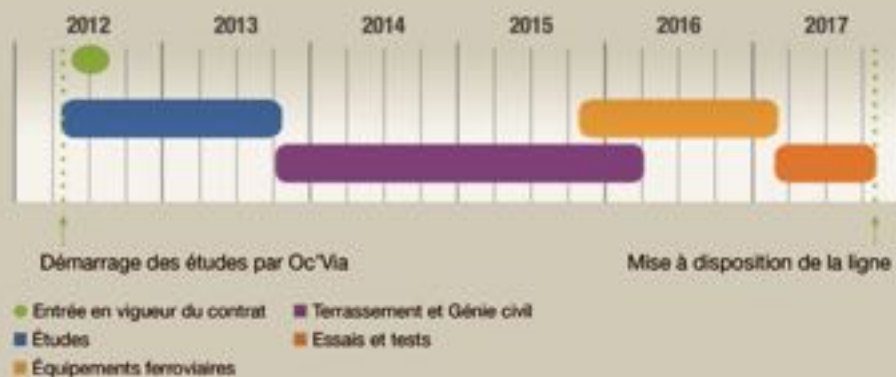
### Libérer des sillons sur la ligne actuelle

Grâce au CNM, la ligne existante sera libérée d'une grande partie des trains de fret et des TGV, et pourra accueillir davantage de TER, en facilitant la mise en place du cadencement. Le CNM permettra en outre de programmer plus facilement et plus régulièrement les opérations de gros entretien sur la ligne classique, afin d'améliorer la fiabilité de l'infrastructure, la régularité des trains et le confort des passagers.

### Sortir le fret des villes

Le CNM permettra de réduire sensiblement les nuisances liées aux trains de fret qui traversent actuellement le centre des communes avec des zones d'habitation denses, la ligne nouvelle traversant essentiel-

## CALENDRIER DU PROJET

© KFH  
2

lement des plaines agricoles denses.

### Favoriser le report modal de la route vers le rail

Un des objectifs du CNM est d'offrir des possibilités nouvelles pour le fret vers l'Espagne, avec une ligne fiable (figure 1) et des sillons plus attractifs. Cela est d'autant plus important dans une région où de nombreux poids lourds circulent sur l'A9 en direction du sud de l'Europe.

### LES CONTRAINTES TECHNIQUES ET OPÉRATIONNELLES LIÉES À LA MIXITÉ

Si, de fait, pratiquement toutes les lignes du réseau français permettent la circulation de trains de fret et de trains de voyageurs, le principe de mixité appliqué à la très grande vitesse constitue toutefois une véritable innovation. La mise en œuvre de ce nouveau concept nécessite un important travail de définition des fonctions de la ligne et du référentiel technique à appliquer, qui doit intégrer à la fois les exigences du fret et de la très grande vitesse, à savoir :

- La Très Grande Vitesse (trains voyageurs jusqu'à 350 km/h sans trains de Fret) ;
- La mixité Grande Vitesse et trains de Fret (trains voyageurs à 300 km/h et trains Fret à 100 km/h) ;
- La circulation d'une mixité performante à la mise en service (trains voyageur à V220 et trains Fret à 120 km/h).

#### Génie civil

La mixité des circulations a un impact non négligeable sur le dimensionnement de l'infrastructure, tant sur la

#### 2- Calendrier du projet.

#### 3- Vue 3D du futur viaduc de l'A54.

#### 2- Project schedule.

#### 3- 3D view of the future viaduct over the A54.

géométrie de la plateforme ferroviaire que le dimensionnement structurel des ouvrages d'art (figure 3).

Le CNM étant une ligne de fret internationale, le référentiel ferroviaire applicable prévoit une majoration des charges ferroviaires standards. Cette majoration de charges induit une augmentation des sollicitations verticales et horizontales. Ce qui se traduit par plus de ferrailage des tabliers en béton armé, un renforcement de la charpente métallique des ouvrages métalliques et des tabliers à poutrelles enrobées, ainsi que des fondations plus importantes. L'augmentation des charges horizontales de freinage-accelération induit un surdimensionnement des appareils d'appui ainsi que de piles et de culées des points fixes des ouvrages du type multi-travée.

La mixité des convois circulant sur le CNM a aussi des impacts sur les vérifications des ouvrages d'art au phénomène de la fatigue. Les calculs doivent tenir compte d'un endommagement cumulé sous TGV et sous trains fret, ce qui peut exiger une augmentation

des dimensions des ouvrages d'art.

#### Tracé

Compte tenu de la vitesse des TGV, qui pourra atteindre à terme 350 km/h, les contraintes de tracé sont fortes, avec des rayons de courbure importants. Par ailleurs, les valeurs retenues pour les limites de dévers (insuffisance et excès de dévers) sont plus contraignantes que sur une ligne du réseau classique, car elles doivent concilier les dévers nécessaires à une circulation à grande vitesse et ceux limités pour les circulations de trains de fret.

Ces contraintes limitent fortement la souplesse sur le tracé de la voie et sur la définition de la ligne et de l'emprise nécessaire (figure 4). Sur le projet CNM, cela se traduit par de faibles marges d'évolution du tracé dans la bande Déclarée d'Utilité Publique, et une prise en compte dès la conception de l'ensemble des mesures conservatoires pour assurer leur faisabilité ultérieure (raccordements au RFN, ajout d'un point de changement de voie, intégration de gares nouvelles, ...).

#### Profil en long

La pente maximale de la ligne nouvelle mixte dépend principalement des caractéristiques des convois fret qui, compte tenu de leur masse, sont les convois les plus contraignants qui emprunteront le CNM.

Afin d'obtenir un profil en long adapté à la fois au TGV et au fret (sans prendre de mesures d'exploitation particulières comme l'adjonction de moyens de traction supplémentaires), le référentiel mixité de RFF prévoit une déclivité ponctuelle maximale de 13,5 mm/m, avec une déclivité moyenne inférieure ou égale à 12,5 mm/m sur une longueur glissante de 350 m et une déclivité moyenne inférieure ou égale à 3 mm/m sur une longueur de 10 km dans les zones à forte déclivité. ▶

© SPIELMANN ARCHITECTE  
3



## TRACÉ DU CNM



4 © ICFH

Ces valeurs sont beaucoup plus contraignantes que celles d'une LGV standard, qui limite la déclivité maximale à 35 mm/m et la déclivité moyenne sur 10 km glissants à 25 mm/m.

### Gabarit

La prise en compte de la mixité des circulations sur la ligne nouvelle conduit à retenir un gabarit compatible avec les deux types de circulation (fret et grande vitesse). Le choix a été effectué en cohérence avec la section Perpignan-Figueras, permettant ainsi la constitution progressive d'un grand itinéraire européen nord/sud, il s'agit du gabarit GIC 3 défini dans la norme EN 15273-3 2009, dont l'enveloppe est détaillée sur la figure 5.

### Entraxe

L'entraxe retenu pour le CNM est de 4,80 m, soit une valeur plus grande que celle généralement pratiquée sur le réseau classique et sur les lignes à grande vitesse (3,72 m et 4,50 m respectivement). À titre de comparaison, la valeur retenue pour la LGV Méditerranéenne était de 4,20 m. Cet écartement permet de limiter l'effet de souffle, notamment lors du croisement de trains à grande vitesse et de trains de fret. Cette valeur, préconisée dans le référentiel mixité, a été confirmée par des études spécifiques au tracé du CNM.

### Signalisation

L'espacement des trains sur le CNM sera assuré, pour une vitesse maximale d'exploitation de 220 km/h à l'ouverture de la ligne en 2017, soit avec de l'ERTMS niveau 1 (figure 6a), soit en signalisation latérale classique (Bloc Automatique Lumineux appuyé de KVB, figure 6b). En effet, l'équipement du parc de locomotives de traction des

trains de fret en système de signalisation embarqué et interopérable ne se répand que progressivement.

Le système d'enclenchement est assuré par des Postes Informatiques basés sur la technologie Slok 2006 d'Alstom Transport. Ces postes sont télécommandés depuis un Poste de Commandement à Distance (PCD) de technologie Mistral, situé à Nîmes.

### Électrification

Le réseau classique est, en Languedoc-Roussillon, électrifié en courant 1500 V continu, alors que les lignes à grande vitesse disposent d'une électrification en 2x25 kV alternatif. Le CNM sera équipé, à l'instar des lignes nouvelles, en 25 kV (figure 7), seule tension à même de répondre aux puissances importantes appelées par la circulation, à terme, des TGV à haute vitesse.

### L'ÉVOLUTIVITÉ DE LA LIGNE

Bien que le tracé prenne en compte l'évolutivité de la ligne vers la grande vitesse mixte (300 km/h) et la très grande vitesse dédiée au trafic voyageur (350 km/h), des adaptations sur les sous-systèmes Voie, Signalisation/Telecom et Caténares seront nécessaires :

### Voie ferrée

- Relevage de la voie de 5 cm de ballast, afin de faire rouler des trains à 300 km/h (25 cm de ballast pour V220, 30 cm requis pour le V300) ;
- Reprise des dévers dans les raccordements paraboliques et les courbes.

### Signalisation

- Dépose de la signalisation latérale de ligne classique BAL+KVB ;
- Mise en place de l'ERTMS de niveau 2 ;

4- Tracé du CNM.

5- Gabarit GIC 3.

4- CNM alignment.

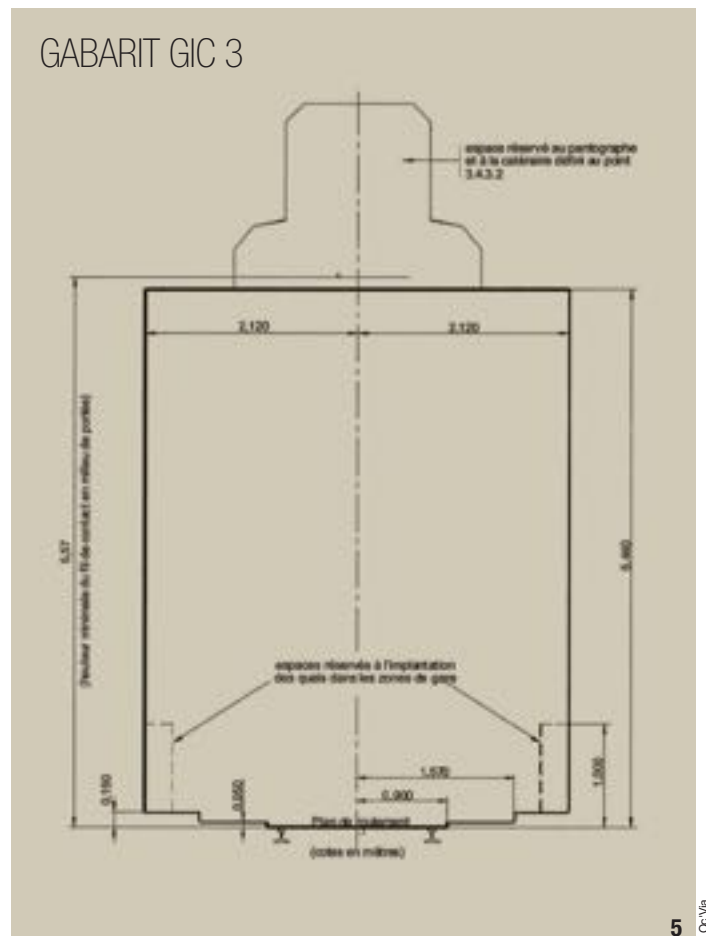
5- GIC 3 gauge.

→ Adaptations des équipements connexes aux systèmes de signalisation ERTMS de niveau 2 (équipements télécom et détecteurs spécifiques) ;

### Caténares

Réglage (tension et géométrie) du fil de contact pour être compatible aux exigences de la grande vitesse.

## GABARIT GIC 3



5 © CC-Via

## UN ENVIRONNEMENT PARTICULIÈREMENT SENSIBLE, NOTAMMENT DU POINT DE VUE HYDRAULIQUE

Dans la continuité de Réseau Ferré de France, l'objectif d'Oc'Via est de réusir l'insertion du projet en minimisant les impacts de la ligne nouvelle sur l'environnement.

Depuis les années 2000, de nombreuses études écologiques ont été menées afin de connaître la biodiversité existant sur le fuseau du CNM et d'apporter des mesures d'évitement, de réduction ou de compensation des impacts potentiels du projet sur les

126 espèces protégées présentes sur le tracé.

Outre la biodiversité, l'eau constitue un sujet majeur pour les 31 communes traversées.

**6a- ERTMS niveau 1.**

**6b- Bloc Automatique Lumineux.**

**6a- ERTMS level 1.**

**6b- Automatic light unit.**

## PRÉSERVER LES MILIEUX AQUATIQUES ET ASSURER LA TRANSPARENCE HYDRAULIQUE

Le CNM traverse un territoire sensible du point de vue des écoulements d'eau, avec de nombreux cours d'eau, dont les débits sont variables et difficilement prévisibles. La région est en effet soumise à des périodes de fortes pluies automnales, les fameux épisodes cévenols. Ces particularités climatiques et géographiques ont conduit Oc'Via à concevoir une ligne essentiellement en remblais, avec de nombreux grands ouvrages de type viaduc (figure 8), garantissant la transparence hydraulique.

Le projet inclut également une dimension écologique, qui conduit à mettre en œuvre des mesures adaptées, en particulier pour la protection des cours d'eau.

### L'avis des services de l'État et du public

La conception de la ligne a été soumise à l'avis des services de l'État et du public, dans le cadre du respect de la réglementation en vigueur en matière de protection des eaux. Il s'agit notamment du Code de l'Environnement (anciennement « Loi sur l'Eau »), qui vise à préserver les milieux aquatiques et les milieux naturels associés, tels que les cours d'eau et les zones humides. C'est pourquoi l'ensemble des travaux est conçu sur la base d'études hydro-

logiques, hydrogéologiques et environnementales validées par les services de l'État et soumis à l'avis des riverains lors des enquêtes publiques effectuées dans les communes concernées. Outre les arrêtés faune et flore, Oc'Via a ainsi obtenu trois arrêtés préfectoraux, pour les bassins versants naturels du Lez et de l'étang de l'Or, pour celui du Vistre (figure 9) et pour celui du Vidourle.

### De nombreux ouvrages pour garantir la transparence hydraulique et la protection des milieux

L'ensemble des ouvrages hydrauliques de la ligne est donc conçu de manière à assurer la sécurité des riverains et des passagers, la pérennité de l'infrastructure ferroviaire ainsi que celle des cours d'eau.

→ Dimensionnement des ouvrages : Pour l'ensemble des cours d'eau et des écoulements traversés par le projet, des études hydrauliques ont été réalisées et ont permis de définir les ouvertures des ouvrages de franchissement permettant de respecter les objectifs de transparence hydrauliques (limitation de l'exhaussement de la ligne d'eau et des vitesses d'écoulement, etc.) fixés dans les engagements de l'État et définis en concertation avec les services de l'État. Le contexte hydraulique particulièrement sensible du projet, associé à un tracé en majeure partie en remblais, a imposé des ouvertures hydrauliques très importantes quantitativement, assurées principalement par les ouvrages d'art. La contrainte de fluidité hydraulique a quant à elle imposé des orientations des appuis dans le sens des écoulements, empêchant la réalisation de tous appuis définitifs et mêmes provisoires dans les lits majeurs des cours d'eau. Cette dernière contrainte majeure influe très souvent directement sur le design et le choix structural de l'ouvrage concerné (cf. viaducs du Lez et du Vidourle).

Pour les grands cours d'eau, des modèles ont été développés ou réutilisés par des bureaux d'études spécialisés (modèles filaire, 2D, à casiers) afin de simuler le comportement des cours d'eau pour différentes crues (crue décennale, centennale et exceptionnelle) et de concevoir les ouvrages.

→ Positionnement des ouvrages :

Le positionnement des piles des ouvrages d'art sur cours d'eau a également été optimisé de manière à minimiser l'impact sur le lit mineur et son milieu écologique et à éviter la formation d'embâcles (accumulation de corps flottants qui peuvent constituer de véritables barrages au droit des ouvrages). ▷

## ERTMS NIVEAU 1

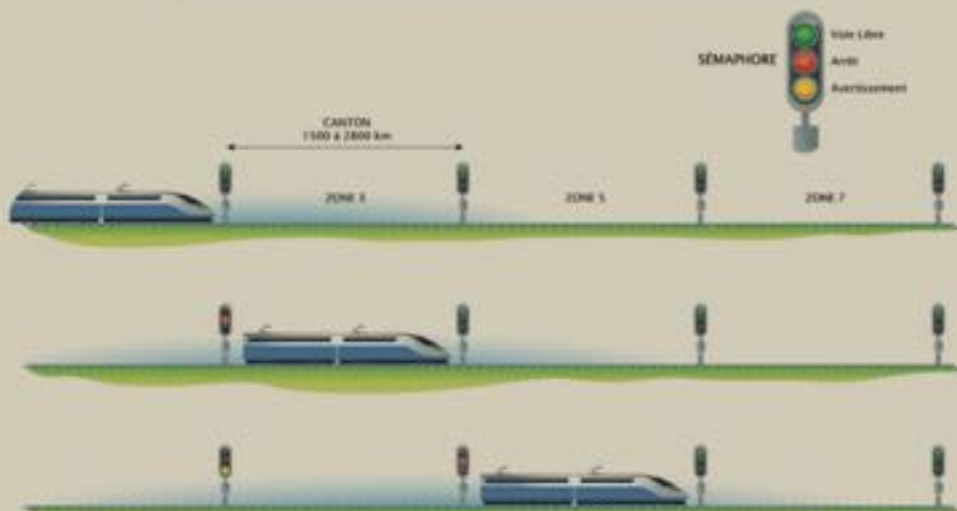
Le système européen de contrôle des trains (niveau 1)



6a

## BLOC AUTOMATIQUE LUMINEUX

Le Bloc Automatique Lumineux (BAL)



6b



**Un système d'assainissement lié aux circulations de fret**

Une autre particularité du projet CNM réside dans la conception de l'assainissement de la plateforme. La mixité de la ligne ainsi que la sensibilité du secteur vis-à-vis du risque inondation a conduit Oc'Via à concevoir un système d'assainissement visant, d'une part, à collecter et stocker toutes les eaux tombant sur la plateforme ferroviaire avant rejet dans le milieu naturel et, d'autre part, à intercepter une potentielle pollution accidentelle grâce à des dispositifs imperméables dans les secteurs sensibles.

Ces deux contraintes ont engendré la mise en place d'un réseau de collecte des eaux de la plateforme sur l'ensemble des zones sensibles de la ligne (caniveaux en crête de plateforme ou fossés en pied de remblai) ainsi que des bassins à chaque point de rejet (imperméables ou non selon la sensibilité du milieu récepteur).

Ces bassins, implantés sur l'ensemble du linéaire, permettent à la fois de collecter et stocker les eaux pluviales tombées sur la plate-forme ferroviaire et les rejeter avec un débit régulé mais également de confiner les éventuelles pollutions accidentelles issues de la ligne dans les zones sensibles en termes d'environnement.

**Limiter l'impact du projet sur les cours d'eau**

La conception des ouvrages de franchissement des cours d'eau a été réalisée en tenant compte de leur enjeu écologique.

Les cours d'eau les plus sensibles sont préservés en phases de construction comme d'exploitation.

**LE SYSTÈME ERTMS  
(EUROPEAN RAIL TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM)**

La réalisation du réseau transeuropéen de transport ferroviaire nécessite que les trains, quelle que soit leur origine, puissent circuler à terme sur l'ensemble du réseau européen et donc que les caractéristiques techniques le permettent. C'est ce que l'on appelle l'interopérabilité. Le système ERTMS vise à harmoniser au plan européen les réalisations techniques en matière de signalisation, en assurant la commande et le contrôle de la circulation des trains via un système embarqué faisant appel aux technologies numériques GSM. L'ERTMS se décline en trois niveaux (1, 2 et 3).

Le lit et les berges sont ainsi exempts de tous travaux.

Par ailleurs, certains cours d'eau font l'objet de dérivations (figure 10) provisoires ou définitives, rendues nécessaires par le passage de la ligne nouvelle.

Pour les dérivations définitives, Oc'Via Construction s'engage à une remise en état, voire à une amélioration écologique, notamment grâce à des renaturations de berges et à la replantation d'essences locales.

7- Ligne 25kv.

8- Vue 3D des futurs ouvrages hydrauliques de la plaine du Vidourle.

7- 25 kV line.  
8- 3D view of future hydraulic structures of the Vidourle plain.



© Oc'Via/Y.BROSSARD

7



8

© SPIELMANN ARCHITECTE

**UN PROJET EN ZONE PÉRIURBAINE AVEC UNE FORTE DENSITÉ D'OA ET UNE CONCEPTION FORTEMENT IMPACTÉE PAR LA TYPOLOGIE DU TRACÉ ET LES CONTRAINTES LIÉES AU CADRE DU PROJET**

La ligne ferroviaire CNM est composée de 60 km de voies nouvelles entre Nîmes et Montpellier et 20 km de voies assurant les 4 raccordements aux réseaux ferroviaires existants.

Ces raccordements imposés et associés au fuseau du tracé de la DUP définissent l'ensemble des franchissements et rétablissements majeurs nécessaires au projet à savoir :

→ Au niveau ferroviaire : les 6 franchissements des lignes LGV Méditerranée Tarascon/Sète et Nîmes/Grau du Roi ;

→ Au niveau autoroutier : le franchissement de l'A54 ;

→ Au niveau routier : les franchissements des voiries nationales et départementales majeures N113 et 313, RD3, 999, 262, 135, 139, 105, 979, 66, 21 et 986 ;

→ Au niveau hydraulique : les franchissements des 48 cours d'eau dont 3 majeurs le Lez (figure 11), le Vidourle et le Vistre ainsi que des canaux BRL, Campagne et Costière.

Outre les contraintes environnementales et de mixité développées précédemment, les vecteurs directeurs architecturaux du projet diligentés par le cabinet Spielmann sont renforcés dans certaines zones périurbaines comme par exemple l'agglomération de Montpellier, avec un design architectural particulier influant directement sur la conception des ouvrages concernés (cf. bowstring du Lez).

D'autre part, les combinaisons de convois, de charges et d'hypothèses de calcul réglementaires spécifiques engendrent des sollicitations et des efforts de calcul totalement inhabituels en ouvrages d'art. Ces dimensionnements particulièrement importants impactent directement le choix et le design des ouvrages d'art, d'autant que les effets sismiques, dynamiques et d'interactions rails structures viennent les majorer.

La typologie du tracé, les contraintes majeures et l'ensemble des négociations de concertation ont imposé la conception de 188 ouvrages d'art sur l'ensemble des 80 km de la ligne du projet, soit un ouvrage tous les 425 m en moyenne (valeur bien supérieure à celle rencontrée précé-

© Oc'Via/Y.BROSSARD



9

© Oc'Via/A.VAUCHER



10

9- Le Vistre.  
10- Dérivation du Bérange.  
11- Vue 3D du futur viaduc du Lez.

9- The Vistre.  
10- Bérange diversion.  
11- 3D view of the future Lez viaduct.



11

© SPIELMANN ARCHITECTE

demment pour des projets de ce type). Pour chaque ouvrage d'art, les contraintes imposées : positions des appuis, portées entre appuis, gabarits à dégager vis-à-vis des voies franchies, profil en long du tracé, bornent précisément et restreignent le choix de la conception des ouvrages. C'est sur ces bases que la MOE, contrainte de surcroît par un planning réduit, a élaboré le design des 188 ouvrages d'art.

**CONCLUSION**

L'enjeu majeur sur le projet CNM est de concevoir et de réaliser une infrastructure ferroviaire robuste, alliant les contraintes de la grande vitesse avec celles d'un fret international lourd. L'exigence d'interopérabilité de l'ouvrage s'inscrit en effet dans le projet plus global des liaisons du nord et de l'est de l'Europe vers l'Espagne. Le CNM doit par ailleurs répondre avec exemplarité aux exigences envi-

ronnementales liées au respect de la biodiversité, aux exigences d'insertion paysagère et surtout de transparence hydraulique. Il s'agit d'un enjeu majeur pour cette infrastructure située dans une des régions les plus ensoleillées d'Europe mais potentiellement sujette à des épisodes torrentiels tout à fait exceptionnels, tels les épisodes cévennols que le chantier a d'ailleurs dû affronter à l'automne 2014. □

**REPÈRES CNM**

- 60 km de ligne mixte, entre Lattes et Manduel
- 20 km de raccordements, notamment liaison fret entre Saint Gervasy et Manduel
- Mise à disposition de SNCF Réseau en octobre 2017

**ABSTRACT**

**THE CNM: A DESIGN CLOSELY LINKED TO THE TRAFFIC MIX AND HYDRAULIC CONTEXT**

AGNÈS ROUSSEAU, OC' VIA - DOMINIQUE REGALLET, BOUYGUES TP - JIMENA NICOSIA, SYSTRA - FABRICE DROUIN, SYSTRA

The "CNM" rail bypass around Nîmes and Montpellier is the first mixed line in France, on which both high-speed trains and freight trains will run. This special feature generates significant design constraints, notably regarding the longitudinal profile and alignment, with an average gradient of less than 12.5 mm/m and large radii of curvature. There are more engineering structures than on other HSL projects. The hydraulic context is sensitive, being characterised by unpredictable watercourses, spells of heavy rain and flood plains. Numerous outlet works are planned to ensure the line's hydraulic transparency. In all, the CNM has one engineering structure every 425 m. □

**LA CIRCUNVALACIÓN DE NIMES Y MONTPELLIER: UN DISEÑO ESTRECHAMENTE RELACIONADO CON SU CARÁCTER MIXTO Y EL CONTEXTO HIDRÁULICO**

AGNÈS ROUSSEAU, OC' VIA - DOMINIQUE REGALLET, BOUYGUES TP - JIMENA NICOSIA, SYSTRA - FABRICE DROUIN, SYSTRA

La Circunvalación Ferroviaria de Nîmes y Montpellier es la primera línea mixta en Francia, por la que circularán tanto trenes de Alta Velocidad como mercancías. Esta especificidad genera exigencias significativas en términos de diseño, particularmente a nivel del perfil longitudinal y del trazado, con una declividad media inferior a 12,5 mm/m e importantes radios de curvatura. Las obras de ingeniería son más numerosas que en otros proyectos de líneas de alta velocidad. El contexto hidráulico es sensible y se caracteriza por cursos de agua imprevisibles, episodios de fuertes lluvias y planicies inundables. Se han previsto numerosas estructuras de desagüe para garantizar la transparencia hidráulica de la línea. En total, la Circunvalación Ferroviaria de Nîmes y Montpellier cuenta con una estructura de este tipo cada 425 m. □





1

© Oc'Via

# LES OUVRAGES D'ART COURANTS (OAC)

AUTEURS : DOMINIQUE REGALLET, DIRECTEUR TECHNIQUE INFRA D'OC'VIA CONSTRUCTION, BOUYGUES TP - NICOLAS BERTHE, RESPONSABLE OA AU SEIN DE LA DT INFRA D'OC'VIA CONSTRUCTION, BOUYGUES TP - BENOIT CHANTEPERDRIX, CHEF DE SERVICE ÉTUDES & TECHNIQUE, DTP TERRASSEMENTS - MARYLINE VERBAUWHEDE, DIRECTEUR ADJOINT ÉTUDES & TECHNIQUE, BOUYGUES TP RF - JACQUES RESPLENDINO, DIRECTEUR DE L'AGENCE DE VITROLLES, SETEC TPI

**LE CNM COMPTE UN OUVRAGE TOUTS LES 425 MÈTRES. PARMI LES 188 OUVRAGES QUI JALONNENT LA LIGNE, 176 ONT ÉTÉ CLASSIFIÉS « COURANTS ». LEUR DIVERSITÉ ET LEURS SPÉCIFICITÉS ONT ÉTÉ DICTÉES PAR DES CONTRAINTES DE PLANNING ET D'ORGANISATION ET PAR DES EXIGENCES TECHNIQUES ET ENVIRONNEMENTALES.**

## FOCUS SUR LES DIFFÉRENTS TYPES D'OUVRAGE D'ART

Le CNM, situé en zone périurbaine, comporte une forte densité d'ouvrages d'art. On en trouve 188 répartis en 3 grandes familles pour l'organisation des équipes travaux :

- OAC : 176 ouvrages d'art courants,
  - OANC : 11 ouvrages d'art non courants,
  - Tranchée couverte de Manduel.
- Ces ouvrages d'art sont répertoriés en 133 ouvrages de type pont-rail (PRA) et 55 ouvrages de type pont-route (PRO).

Un type particulier d'ouvrage a été retenu pour répondre à chaque nécessité et contrainte du projet, ce qui se traduit par une multiplicité de types d'ouvrages d'art et de techniques de réalisation.

Tous ces ouvrages d'art conservent néanmoins les mêmes lignes directrices architecturales, définies par le Cabinet Spielmann (figure 2).

On dénombre ainsi de fait :

- Pour les OANC (cf. article spécifique) :
  - 1 bowstring métallique mixte mono-travée lancé ;

### 1- Le saut de mouton à Valergues.

### 1- The flyover at Valergues.

- 1 ouvrage mixte quadri-poutres bi-travées lancé ;
  - 5 ouvrages quadri-poutres béton armé préfabriquées et entretoisées sur palées provisoires.
- Pour la tranchée couverte (cf. article spécifique) :
- 2 ouvrages préfabriqués de 3100 t et 4100 t ripés sous le faisceau ferroviaire TGV et RFN ;
  - 2 zones de tranchée en parois moulées ;
  - 1 zone de tranchée centrale en jet grouting réalisé en sous œuvre.
- Pour les OAC :
- 1 Warren métallique mixte mono-travée lancé ;
  - 3 RAPL métalliques mixtes mono-travée dont 2 lancés ;
  - 2 ouvrages mixtes bipoutres multi-travées lancés ;



### 53 ouvrages d'art multi-travées :

- 11 TPE (tablier poutrelles enrobées) dont :
  - 9 PRA constitués de 18 à 23 poutrelles de types HBL 1000 à HLR 1 100 x 607 de nuance S355,
  - 2 PRO constitués de 15 à 19 poutrelles de types HEA 900 et HEB 1000 de nuance S460.
- 16 PRAD (tablier à poutres précontraintes par fil adhérents), tous ponts-routes fondés sur culées perchées en terre renforcée ;
- 29 PSDA (tablier dalle béton armée) dont 29 PRA et 1 PRO ;
- 7 PSDP (tablier béton post-contraint) tous ponts-routes.

### 103 ouvrages d'art mono-travée :

- 3 SDM (saut de mouton) dont 2 sur voies existantes de type PIPO (passage inférieur à portique ouvert) à poutres dalles béton armé encastrées (figure 1) ;
- 1 sur voie nouvelle de type PICF (passage inférieur à portique ouvert) ;



2  
© SPIELMANN ARCHITECTE

#### 2- Vue 3D du futur viaduc du Vidourle.

#### 3- Bétonnage du PRA SC674-0.

#### 2- 3D view of the future Vidourle viaduct. 3- Concreting rail bridge SC674-0.

- 62 ouvrages d'art préfabriqués dont :
  - 47 OPTICADRES type PICF de 3 à 7,5 m d'ouverture,
  - 5 OPTIPIEDS type PIPO de 8 à 10 m d'ouverture,
  - 10 voûtes dont 2 doubles de 3 à 8 m d'ouverture.
- 48 ouvrages d'art de type PICF, PIPO ponts rails ballastés ou non et ponts routes ainsi que PIPAL

ponts routes (passage inférieur fondé sur palplanches).

Quelques singularités propres au projet CNM méritent d'être mises en avant, notamment :

- L'organisation des études d'exécution,
- Les culées de certains ouvrages PRO en sol renforcé VSOL,
- Le SDM RLO15-2, avec des fondations mixtes en zone karstique (cf. article spécifique),
- Un ouvrage réalisé en béton recyclé.

### L'ORGANISATION DES ÉTUDES D'EXÉCUTION UN PLANNING CONTRAINT

Les études d'avant projet détaillé (APD) de la partie infrastructure du projet CNM se sont déroulées entre juin 2012 et juillet 2013. Ces études ont majoritairement été développées par les ingénieries Setec et Systra, assurant également le rôle de maître d'œuvre sur le projet (MOE), mais aussi avec l'aide ponctuelle des bureaux d'études internes de Bouygues Travaux Publics et Spie Batignolles TPCI.



3  
© Oc-Via





4

© VSO<sup>®</sup>

Sur la base du dossier APD4, le premier dossier de consultations des entreprises (DCE) a été envoyé aux bureaux d'études (BE) en mai 2013. À l'issue d'un second tour de consultation en juin 2013, les différents lots études ouvrages d'art (OA) ont été attribués le 5 juillet 2013. Le dossier APD5 a été finalisé début juillet 2013. La réunion de lancement des études d'exécution a eu lieu le 12 juillet 2014, marquant ainsi le démarrage effectif des études d'exécution des OA du projet CNM. Les travaux de génie civil des OA devant être terminés fin 2015, Oc'via Construction dispose d'environ deux années pour concevoir et réaliser 188 ouvrages. Les études d'exécution des OA doivent se terminer au premier trimestre 2015, l'avancement à fin novembre 2014 est d'environ 85 %.

#### L'ORGANISATION DES ÉTUDES

Une Direction Technique Infrastructures (DT Infra, 25 personnes en pointe), rattachée à la Direction de Projet, a été mise en place afin de gérer le développement des études d'exécution, celles-ci étant réalisées par les bureaux d'études sous-traitants. Les principales missions de la DT Infra peuvent être résumées comme suit :

- Analyser et communiquer les données d'entrée (APD5 et autres documents) ;
- Piloter la production des notes et plans d'exécution, et vérifier les données de sortie ;

- Assurer un rôle de coordination et communication, et gérer les interfaces (OA vs terrassements, assainissement, réseaux, équipements ferroviaires (EF), exigences du mainteneur, etc.) ;
- Apporter son expertise dans la phase d'exécution ;
- Piloter le dossier de récolement nécessaire à la préparation du dossier des ouvrages exécutés.

Au vu de la multiplicité des types d'ouvrages, la DT Infra a jugé préférable de définir les lots études en fonction du type d'ouvrage, plutôt que de choi-

#### 4- Vue aérienne du PRO LF 028-0.

#### 4- Aerial view of road bridge LF 028-0.

sir un découpage par tronçon. Voir le tableau 1 pour la répartition des études d'exécution du génie civil des OA. À noter également que 62 ouvrages parmi les ouvrages de type portique, cadre et dalot sont préfabriqués par

le sous-traitant Matière, les ouvrages de type voûte sont d'ailleurs étudiés par ce dernier.

La mission géotechnique G3 est assurée par Terrasol.

En phase d'exécution, la mission visa est assurée par les ingénieries Setec, Systra et Socotec.

#### LES PRINCIPAUX DÉFIS À RELEVER

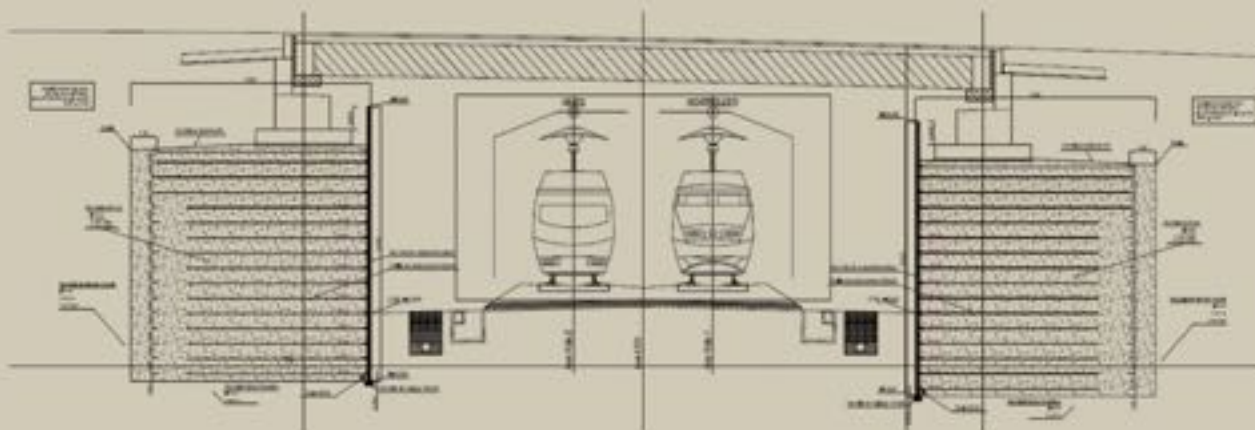
Le premier défi est lié au respect du planning du projet.

Les premiers bétons étant prévus coulés en décembre 2013, il a fallu, en

TABLEAU 1 : RÉPARTITION DES ÉTUDES D'EXÉCUTION DU GÉNIE CIVIL DES OA

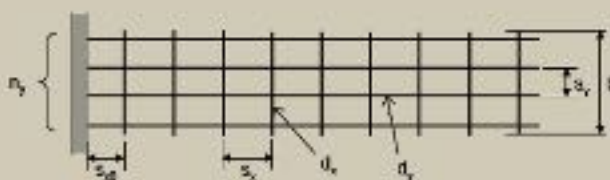
Lot	Type de franchissement	Type d'ouvrage	Bureau d'études
1	PRA	Bowstring / quadripoutres béton armé / bipoutre mixte	ACGO (ARTES / C2ODA / GRONTMIJ / OTCE)
2	PRA	Quadripoutres béton armé	BMCI
3	PRA	Sauts de mouton	AIA
4	PRO	PRAD	ARCADIS
5	PRO	PSDP	ARCADIS
6	PRA	Viaducs mixtes	SPIE BATIGNOLLES TPCI / SECOA
7	PRA	Poutrelles enrobées	AIA
8	PRA (figure 3)	Portiques PRA	BMCI
9	PRA	Cadres ouverts PRA	COGECI / SIAM Ingénierie
10a	PRA	Dalots	SETI
10b	PRA	Dalles béton armé	INGEROP
11	PRO	Cadres ouverts / fermés PRO	SETI
12	PRO	Tranchée de Manduel	SPIE BATIGNOLLES TPCI

## COUPE DES MASSIFS RENFORCÉS



© VSOL®

## TREILLIS MÉTALLIQUE



© VSOL®

quelques mois, s'approprier les données d'entrée APD, effectuer une revue de conception (au terme de laquelle des propositions d'optimisation ou d'homogénéisation des ouvrages ont été faites), réaliser les études d'exécution proprement dites, obtenir le visa de la MOE, diffuser les documents Bon Pour Exécution (BPE).

Les équipes travaux étant mobilisées simultanément sur l'ensemble du tracé, environ 30 à 40 % des ouvrages ont dû faire l'objet d'un processus d'études accéléré, nécessitant des ressources adéquates à tous les échelons de la chaîne de production et de contrôle.

Les enjeux techniques liés aux calculs en phase exécution sont notamment liés à la particularité de CNM d'être une ligne mixte trains voyageurs/trains fret, et par conséquent à l'obligation réglementaire de considérer un coefficient de majoration des charges ferroviaires standard, noté  $\alpha$ , pris égal à 1,33. Cette majoration des charges ferroviaires de 33% a une influence importante sur le dimensionnement des ouvrages :

→ Elle induit une augmentation des sollicitations des tabliers. Il en résulte

### 5- Coupe des massifs renforcés.

### 6- Treillis métallique.

### 5- Cross section of strengthened foundations.

### 6- Metal lattice.

une augmentation du ferrailage nécessaire pour les tabliers en béton armé, ainsi qu'une augmentation de la charpente métallique nécessaire pour les ouvrages métalliques et les tabliers en poutrelles enrobées ;

- Les calculs dynamiques ont, dans certains cas, remis en cause les équarrissages APD (augmentation des hauteurs des poutres des RAPL, augmentation de l'épaisseur des traverses des portiques, cadres et dalots) ;
- Les efforts verticaux transmis aux piles et culées sont également augmentés dans la même proportion,

ce qui se traduit par une augmentation des charges verticales transmises aux fondations et donc une augmentation des fondations ;

- Les efforts horizontaux très importants liés au séisme ont complexifié la mise au point de certains appuis et appareils d'appui, sur les ponts dalle et les tabliers en poutrelles enrobées ;
- Les calculs complexes d'Interaction Rail-Structure (IRS) ont conduit à augmenter le nombre de pieux sur l'ouvrage du Lez/Lironde.

Enfin, la gestion des interfaces représente un défi majeur. En effet, le très grand nombre d'intervenants sur ce projet nécessite une gestion et un partage maîtrisé de l'information, que les données d'entrée soient vérifiées et fiables, que les mises à jour soient intégrées en temps réel dans les études d'exécution.

### DES OUVRAGES D'ART SUR CULÉES PORTEUSES VSOL® (figure 4)

Un des enjeux du chantier du Contournement de Nîmes et Montpellier est la nécessité de réaliser de nombreux ouvrages en un temps record, dès la première phase des travaux.

### UN CHOIX STRATÉGIQUE COMPTE TENU DU PLANNING

À titre d'exemple, à l'extrémité Ouest du projet, un nouveau passage supérieur de type pont route (PRO), plus large que l'ancien ouvrage, devait être mis en œuvre rapidement pour assurer le franchissement des voies existante RFN du raccordement de Lattes sur le réseau en service.

Afin de réaliser ce franchissement des voies en respectant le planning, l'équipe de conception du projet a choisi de réaliser des culées perchées sur des massifs en sol renforcé de type VSOL® (figure 5).

En effet, le système VSOL® est simple, rapide et économique. Par ailleurs, il ne nécessite pas de mobiliser des moyens de génie civil lourds, qui se révèlent problématiques lorsque la circulation des TGV est maintenue à moins de 7 m des travaux.

### CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES OUVRAGES

Le remblai renforcé VSOL® est composé 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.

La combinaison de ces trois éléments (sol, armatures, parement) dans le système VSOL® crée un mur de soutènement particulièrement stable et pérenne.

#### 1- Parement :

Le parement est constitué d'éléments structuraux qui confinent le matériau de remblai et qui sont solidarités par les treillis de renforcement.

Dans le cas du projet CNM le parement est constitué d'écaillés préfabriquées en béton armé de dimension 2,25 x 2,10 m, avec une finition en béton lisse. Les écaillés sont disposées en arc de cercle afin de répondre à une exigence architecturale.

#### 2- Renforcement :

Les armatures de renforcement sont constituées de treillis métalliques en forme d'échelles (figure 6).



L'interaction entre ces inclusions et le sol est très importante du fait de leur forme qui permet de développer une résistance d'adhérence très élevée. L'interaction sol/renforcement est double. La résistance à l'extraction des armatures résulte d'une part de la butée du sol contre les barres transversales et d'autre part du frottement le long des barres longitudinales.

Élevée, elle constitue un avantage majeur du système VSol® acier, comparé à d'autres techniques de renforcement. Les efforts repris par les barres transversales sont transmis aux barres longitudinales tendues.

La butée du sol contre les barres transversales constitue le mécanisme d'interaction dominant : 80% environ de la résistance d'adhérence des échelles lui sont imputables, contre 20% imputables au frottement.

Ceci assure une excellente stabilité à l'ouvrage, avec un degré de fiabilité élevé et une excellente planéité du parement. Les armatures relient celui-ci au massif de sol et reprennent les efforts horizontaux générés à la fois au sein du massif renforcé et à l'arrière du mur.

### 3- Remblai technique :

Les matériaux de remblai des murs VSol® ont été choisis pour répondre à la fois aux exigences du système (granulométrie, résistance au cisaillement, perméabilité, pH, propriétés électrochimiques) et aux spécifications du projet. Les murs VSol® utilisent principale-



7

© VSol®

ment comme remblais des matériaux frottants comportant moins de 15% de fines (< 80 µm), avec une dimension maximale de 80 mm.

Ces matériaux proviennent de carrières situées à proximité immédiate du chantier, ce qui renforce leur intérêt économique et écologique.

Le dimensionnement est réalisé conformément à l'annexe nationale de l'Euro-

**7- Montage des culées.**

**8- Vue du PRO SC 342.**

**7- Abutment assembly.**

**8- View of road bridge SC 342.**

code 7 : NFP 94.270 et au référentiel technique de la SNCF et de RFF (IN 203 de septembre 2013), ces ouvrages sont dimensionnés pour une durée de vie de 100 ans. Les calculs de dimensionnement doivent permettre de répondre à la double exigence de stabilité interne et externe.

Le suivi rigoureux des ouvrages est assuré par une série de témoins de durabilité insérée dans les ouvrages et qui permettra de veiller tout au long de la vie de l'ouvrage au bon comportement des armatures métalliques.

Dans certains tronçons, le choix architectural s'est porté vers la réalisation de culées des ouvrages PRO sous la forme d'un arc de cercle, permettant une insertion esthétique dans son environnement proche (figure 7).

En parallèle de la mise en œuvre des témoins de durabilité, le référentiel technique demande également la mise en œuvre de témoins de potentiel qui permettront lors des premiers essais sur la ligne, de mesurer les éventuels courants qui pourraient s'établir dans les armatures du massif renforcé (figure 8).

### 17 OUVRAGES VSOL® SUR LE TRACÉ

Ainsi, les culées de 17 ouvrages d'art ont été réalisées au moyen de massifs en sol renforcé VSol®, qui reprennent les charges issues du chevêtre et du tablier. Les ouvrages répondent aux exigences de l'arrêté du 26 octobre 2011,



8

© CC-Via

relatif à la classification et aux règles de construction parasismique : ils se situent dans une zone de sismicité 2 ou 3 (sismicité faible à modérée).

Au total, ce sont plus de 10 000 m<sup>2</sup> de sol renforcé VSol<sup>®</sup> qui seront réalisés sur l'ensemble du tracé. La construction des 17 ouvrages PRO, représentent près de 2 500 écaillés en béton armé et plus de 250 t d'armatures en acier galvanisé.

### CONSTRUCTION D'UN OUVRAGE D'ART EN BÉTON DE GRANULATS DE BÉTONS RECYCLÉS

Une innovation environnementale sur le chantier du Contournement ferroviaire de Nîmes Montpellier (CNM) réalisé par Oc'Via Construction.

L'utilisation de bétons formulés à partir de granulats de bétons recyclés est désormais autorisée par la norme NF EN 206-1/CN avec toutefois certaines limites d'emploi. Le nombre de réalisations avec ce type de matériau reste donc faible et les retours d'expérience rares, notamment dans le domaine des ouvrages d'art.

Fort de ce constat, Oc'Via Construction et le groupe Setec (MOE) ont souhaité, dans le cadre d'une démarche commune d'innovation portant sur la valorisation des matériaux recyclés, étudier la faisabilité technique et industrielle d'un béton de granulats recyclés sur un des ouvrages du projet (figure 9). Cette opération de démonstration, réalisée avec le soutien du projet national Recybéton, a ainsi conduit au développement et la mise en œuvre d'un béton à granulats recyclés BGR sur un ouvrage de type véloroute : PRO RE 411-1 (pont cadre très biais), dont la traverse et les murs ont été réalisés en BGR.

Les granulats de béton ont été fournis par la carrière LRM basée à Saturar-

#### 9- Bétonnage du PRO RE 411-1.

#### 9- Concreting road bridge RE 411-1.

© Oc'Via



gues, située à une vingtaine de kilomètres de la centrale à béton d'Unibéton de Codognan en charge de la réalisation du béton.

Pour cet ouvrage, le projet prévoit un béton de type C35/45 XC4 XF1 mais la formulation mise en œuvre par Bouygues TP pour CNM permet de résister à des environnements plus agressifs.

L'objectif de cette démarche est double :

- Démontrer la faisabilité industrielle d'un tel béton et en apprécier l'intérêt sur le plan environnemental ;
- Identifier les freins actuels liés au développement de ce type de béton en France et apporter de nouvelles pistes de travail pour favoriser son déploiement.

La formulation béton BGR a été établie en substituant une partie du gravillon de la formule de référence du projet par 20% de gravillons recyclés, avec un dosage correspondant au seuil maximum de la norme.

En parallèle à cette première étude, trois autres formules innovantes ont été étudiées afin d'évaluer l'impact du dosage en granulats recyclés et la nature de ce granulats sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité du béton.

Ces formules font actuellement l'objet d'essais de caractérisation spécifique, réalisées par le Lerm, en particulier l'évaluation de nombreux indicateurs de durabilité.

Les premiers retours d'expérience obtenus sur le béton, en particulier les indicateurs de durabilité, sont très prometteurs.

Ces analyses devraient permettre de poursuivre le déploiement de cette application sur d'autres ouvrages annexes à la section courante de la CNM, à titre expérimental, notamment en utilisant une formule plus largement dosée en granulats recyclés, voire en travaillant avec une substitution totale des granulats de référence par des granulats recyclés.

L'ensemble des résultats d'essais et des réalisations feront l'objet de publications lors de congrès ultérieurs (congrès GC2015 de l'AFGC, publications au sein du projet national Recybéton...). □

#### ABSTRACT

#### STANDARD ENGINEERING STRUCTURES

D. REGALLET, BOUYGUES TP - N. BERTHE, BOUYGUES TP - B. CHANTEPERDRIX, DTP TERRASSEMENTS - M. VERBAUWHEDE, BOUYGUES TP - J. RESPLENDINO, SETEC TPI

**One of the specific features of the CNM project is the high density of engineering structures:** 188 in all, including 176 standard engineering structures. To allow for all the technical, environmental and organisational constraints, numerous types of structures are used. For example, there are: 63 multi-span structures, of four types (filler-beam deck, bonded post-tensioned, reinforced concrete slab and prestressed slab overpasses), and 113 mono-span structures, of five types (flyover, prefabricated structures, and open, closed and aluminium portal underpasses). The project was therefore organised accordingly, for both design engineering and works, giving priority to a breakdown by type of structure and not a breakdown by sections. The main challenge remains complying with the schedule, since the structures are due to be completed by end-2015. □

#### LAS OBRAS DE INGENIERÍA CORRIENTES

D. REGALLET, BOUYGUES TP - N. BERTHE, BOUYGUES TP - B. CHANTEPERDRIX, DTP TERRASSEMENTS - M. VERBAUWHEDE, BOUYGUES TP - J. RESPLENDINO, SETEC TPI

**Una de las especificidades del proyecto CNM es la gran densidad de obras de ingeniería:** 188 en total, de las cuales, 176 corrientes. La toma en cuenta de todas las exigencias técnicas, ambientales y organizativas se refleja en una multiplicidad de tipos de estructuras. De este modo, se pueden contar 63 obras de ingeniería multitrans, cuatro tipos de estructuras (TPE, PRAD, PSDA y PSDP), y 113 obras de ingeniería monotramo, cinco tipos de estructuras (SDM, obras prefabricadas, PICF, PIPO y PIPAL). El proyecto se organizó en consecuencia, tanto en proyectos como en obras, dando prioridad a un desglose por tipo de obra y no por tramo. El principal reto sigue siendo la dirección de la planificación, dado que las obras deberían terminar a finales de 2015. □





# LE VIADUC DU VISTRE ET DE LA SARELLE

AUTEURS : OLIVIER BLANC, DIRECTEUR DE PROJETS, RESPONSABLE DE LA MOEG GC TRAVAUX, SETEC INTERNATIONAL - CLAUDE BASSETTE, RESPONSABLE OA DE LA MOEP SECTEUR GARD, SETEC TPI - LUC DE SAINT PALAIS, INGÉNIEUR MOE CHARGÉ DU SUMI DES TRAVAUX DES OUVRAGES DU VISTRE, SETEC TPI - VINCENT BEAUDOU, CONDUCTEUR DE TRAVAUX AU SEIN DE LA DIRECTION TRAVAUX D'OC'VIA CONSTRUCTION, BOUYGUES TP

**LE VIADUC DU VISTRE ET DE LA SARELLE EST TRÈS REPRÉSENTATIF DU DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES HYDRAULIQUES DU CNM. SA VOCATION EST DOUBLE : D'UNE PART FRANCHIR DES RIVIÈRES DONT LE DÉBIT PEUT AUGMENTER SOUDAINEMENT ET D'AUTRE PART TRAVERSER UNE PLAINE INONDABLE.**

## UN OUVRAGE DE FRANCHISSEMENT À VOCATION HYDRAULIQUE

L'ouvrage d'art dit du Vistre porte la ligne à grande vitesse du Contournement de Nîmes et Montpellier. Il est localisé sur la commune de Vestric-et-Candiac dans le Gard (PK 49+5 de la LGV). Sa vocation hydraulique est large, puisqu'il assure tout à la fois la transparence hydraulique de la plaine du Vistre, le franchissement du fleuve côtier le Vistre et le franchissement du ruisseau la Sarelle (auss appelé Vieux Vistre).

Le franchissement, d'une longueur totale de 345 m, se caractérise par l'association de deux ouvrages consécutifs. Il est constitué d'une succession de tabliers, chacun d'une longueur

dilatante inférieure à 90 m (figure 2). Il permet ainsi de s'affranchir des appareils de dilatation des voies onéreux et dont la maintenance est délicate. D'est en ouest, il est composé :

- D'un ouvrage de type bi-poutre en ossature mixte acier-béton (l'ouvrage de franchissement du fleuve côtier Le Vistre PRA SC495-0) de 87 m et biais (82,6 grades, appuis parallèles à l'axe théorique du lit du Vistre) ;
- Puis par un ouvrage droit de longueur totale 261 m de type quadri-poutre en béton armé, constitué de quatre tabliers élémentaires consécutifs (l'ouvrage de franchissement du ruisseau la Sarelle et de transparence hydraulique de la plaine du Vistre PRA SC497-0), typologie de

1 - Vue aérienne du viaduc du Vistre.

1 - Aerial view of the Vistre viaduct.

tablier classique pour les ouvrages ferroviaires de portée inférieure à 30 m.

La jonction des deux ouvrages est réalisée par une pile-culée massive (PC3). L'ouverture hydraulique de l'ouvrage a été calée pour satisfaire les exigences de transparence vis-à-vis de la crue de référence du PPRi.

## LA PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE

### UN CONTEXTE HYDRAULIQUE PARTICULIÈREMENT SENSIBLE

Les ouvrages de franchissement du fleuve le Vistre et de la rivière de la Sarelle (aussi dénommée Vieux Vistre) sont implantés dans une zone à très fort enjeu hydraulique.

Les enjeux bâtis sont constitués au nord des zones urbanisées de Vestric-et-Candiac et du complexe industriel de Nestlé Water (produisant la célèbre eau pétillante Perrier). On notera également, à proximité de la ligne, la présence d'un mas et d'anciennes gravières au sud. En dehors, la zone inondable du Vistre est constituée par des plaines agricoles. (figure 3).

## PLAN DE SITUATION



© Oc'Via CONSTRUCTION

2

Le débit de dimensionnement retenu par Oc'Via, en concertation avec les services de l'État, est de 530 m<sup>3</sup>/s, crue de référence du PPRi.

L'hydrogramme de crue est construit à partir d'une pluie centennale, de durée 24 h à l'échelle de l'ensemble du bassin versant.

À titre d'exemple, le débit de pointe de la crue de 2005 a été de 400 m<sup>3</sup>/s (figure 4).

La zone inondable du Vistre pour cet événement touche les zones urbanisées au sud de Vestric-et-Candiac et le site de production de Nestlé (source Perrier). Notons également que certaines gravières se remplissent lors de l'événement.

Le positionnement des ouvrages de franchissement est obtenu par simulations successives de la crue, en conjuguant le paramètre hauteur et le paramètre vitesse d'eau. L'impact de l'ouvrage sur la zone d'écoulement est d'autant plus limité que les remblais et les culées sont positionnés

**2- Plan de situation.****3- Localisation.****2- Location drawing.****3- Location.**

dans les zones de faible écoulement. De manière conjointe avec la construction de l'infrastructure LGV, d'autres aménagements ayant des incidences sur l'écoulement des crues du Vistre ont été envisagés sur la zone par Oc'Via Construction :

- 1-** Pour rétablir la gravière traversée par le remblai à l'amont de la RD139, liaison des deux plans d'eau par 6 buses d'un diamètre 1 000 mm ;
- 2-** Aménagement des gravières à l'aval du canal d'irrigation Philippe Lamour, offrant un volume de stockage de l'ordre de 1 million de m<sup>3</sup> et alimentées en cas de crue par un déversoir latéral à la plaine du Vistre, équipé de fusibles.

Après différents tests d'ouverture, le projet retenu permet de respecter les critères de remous admissible fixés. Les cartes (figures 4 et 5) indiquent la zone d'influence hydraulique du projet pour le débit de référence de la crue retenue dans le cadre du PPRi du Vistre. L'ouvrage retenu permet le franchissement du Vieux Vistre jusqu'au lit mineur actuel du Vistre sans zone de remblai avec, uniquement sur ce linéaire, la présence de piles de dimension moyenne 2 m. La simulation faite avec un débit de pointe de 400 m<sup>3</sup>/h (crue observée en 2005) montre que les critères de dimensionnement sont également respectés pour ce niveau de crue. En dehors du lit mineur, la vitesse d'écoulement est globalement comprise entre 0,5 et 1 m/s au niveau du franchissement.

Les autres simulations réalisées ont permis de dimensionner l'ouvrage de franchissement ainsi que les aménagements connexes. La modélisation 2D mise en oeuvre dans l'étude confirme que le dimensionnement de l'ouvrage de franchissement du Vistre (pile de dimension 2 m) proposé respecte :

- Les critères retenus pour le débit de projet de 530 m<sup>3</sup>/s (crue de référence du PPRi) ;
- Les critères de remous admissibles retenus sur les zones urbanisées à enjeu, tout en offrant un niveau de protection amélioré au droit du site industriel Nestlé, qui constitue un enjeu économique local important.

### LES CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES DU SITE

D'une manière générale, les formations géologiques présentes sur la zone sont successivement :

- Les remblais de reprofilage du lit du Vistre à dominante sablo-graveleuse ;
- Les alluvions modernes (Fz) en fond de plaine alluviale, argiles silteuses grises assez plastiques ;
- Les alluvions villafranchiennes ou Formations Détritiques des Costières (Fvb) constituées d'une forte proportion de galets et graviers dans une matrice argilo-sableuse rouge ;
- Le faciès marno-silteux Astien (p2a), couleur sable ;
- Le complexe argilo-marneux gris du Pliocène inférieur, communément appelé Plaisancien (p1), substratum du site.

La nappe baigne les alluvions superficielles à faible profondeur, soit environ 1,5 m sous le niveau du terrain naturel. ▷

## LOCALISATION



© Oc'Via CONSTRUCTION

3



**ZOOM SUR LE FRANCHISSEMENT  
DU VISTRE**

La lithologie est la suivante :

- Terre végétale sur 20 à 30 cm ;
- Dans le lit du Vistre, des alluvions modernes Fz sur 1 à 2 m maximum, impactant éventuellement la pile Ouest ;
- Au niveau des culées et de la pile Est, les graves du Villafranchien Fvb affleurent directement sous la TV, sur une épaisseur de 8 m, elles sont globalement compactes (pression limite moyenne autour de 1,9 MPa), mais présentent un niveau un peu plus faible entre 5 et 7 m, en particulier sous la culée Est (pression limite 0,7 MPa).
- Les sables Astiens p2 à partir de la cote +5,5 NGF sur environ 5 m, très compacts (pression limite supérieure à 3 MPa), sauf localement au droit du sondage de la pile Ouest, où 2 essais sont plus faibles ;
- Les marnes grises du Plaisancien au-delà, très compactes également.

Le niveau de la nappe est lié au niveau du Vistre, vers 3 m de profondeur par rapport à la plaine.

Selon le décret n°2010-1254 en vigueur depuis mai 2011, le site s'inscrit en zone de sismicité 2 « faible » avec une accélération horizontale de référence agr = 0,7 m/s<sup>2</sup>.

Le contraste entre les formations de surface plutôt molles et les formations en profondeur plutôt raides a conduit à classer E le sol.

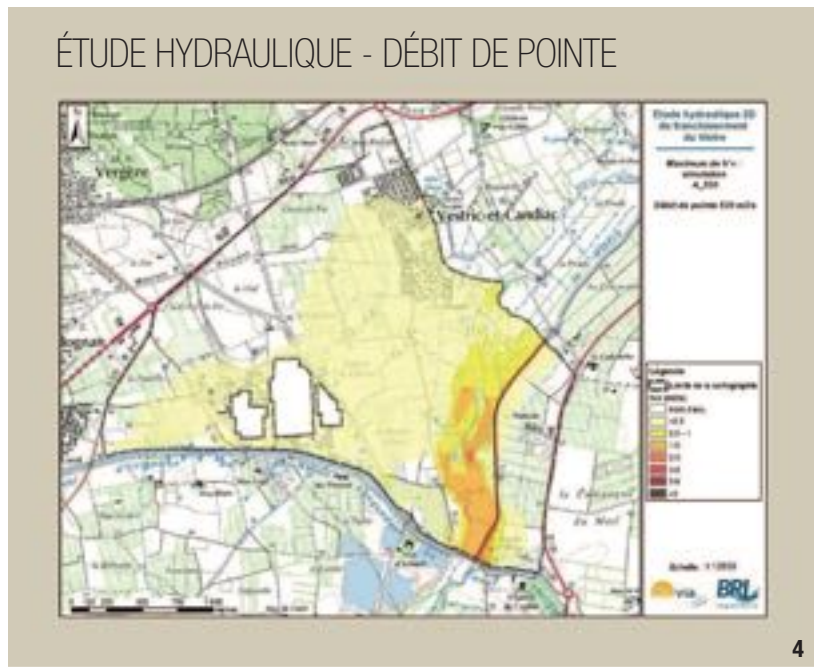
**UN ENVIRONNEMENT HUMIDE  
PROTÉGÉ**

Le cours d'eau la Sarelle (Vieux Vistre) présente une qualité écologique moyenne et un état patrimonial moyen. Cependant, il constitue un milieu à haute valeur écologique avec la présence d'une ripisylve continue.

Le cours d'eau est classé en Liste 1 au titre de l'art. L214.17 du code de l'environnement et en Zone d'Action Prioritaire Alose/Anguille/Lamproie. La zone humide présente un enjeu majeur, abritant plusieurs espèces remarquables dont la Cistude d'Europe (*Emys orbicularis*) et la rainette méridionale (*Hyla meridionalis*).

La Cistude d'Europe vit dans les zones humides aux eaux douces, calmes et bien ensoleillées : marais, étangs, fossés, cours d'eau lents, canaux.

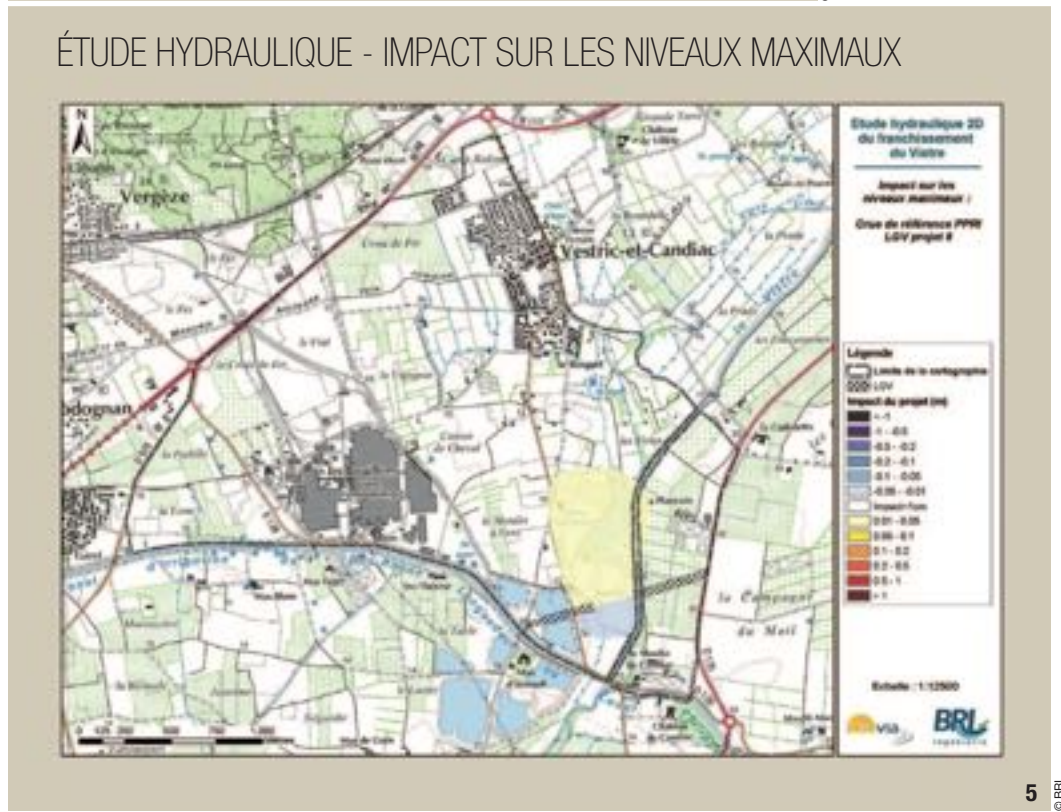
Elle apprécie les fonds vaseux et la végétation aquatique abondante qui fournissent nourriture et abris en quantité. Son territoire peut s'étendre sur près de 10 ha de zone humide.



4- Étude hydraulique - débit de pointe.  
5- Étude hydraulique - impact sur les niveaux maximaux.

4- Hydraulic study - peak flow rate.  
5- Hydraulic study - impact on maximum levels.

4 © BRL



5 © BRL

Pour prendre ses bains de soleil, elle recherche activement les troncs d'arbres flottants, les branches basses de tamaris en berge.

La rainette méridionale est une espèce relativement commune qui va occuper les pièces d'eau (secteurs végétalisés), fossés, zones inondées et rivières à faible courants.

Au regard des différents critères, le viaduc enjambe le lit mineur de manière à conserver le lit initial (ouvrage hydraulique de type 2a) (figure 6).

**LES DONNÉES FONCTIONNELLES DE L'OUVRAGE  
LES CARACTÉRISTIQUES DE LA VOIE PORTÉE**

La voie portée est composée de 2 voies ferrées ballastées d'entraxe 4,80 m. L'ouvrage s'inscrit successivement dans une clothoïde (A=1 464) sur les ¾ du PRA SC495-0 et dans un alignement droit sur le PRA SC497-0. Le profil en long suit une déclivité de 0,85 %.

Le dévers de la voie est variable, cependant, comme tous les ouvrages

de la LGV CNM, le profil des tabliers présente un dévers en toit constant de 2,5 %, la correction de dévers n'étant assurée que par la voie portée.

Les voies sont ballastées et la ligne est conçue pour permettre à terme une circulation des convois ferroviaires voyageurs à 350 km/h.

**LE RÉFÉRENTIEL DE CALCUL UTILISÉ**

Les hypothèses de calcul sont basées sur le Référentiel Technique CNM,

Tome IV « Ouvrages d'art » du RT PPP et de l'IN 3278, en particulier :

- Les Eurocodes,
- L'IN 0032 (ex Livret 2.01),
- L'article 4.10.1.6.3 du tome VII de l'IN 3278.

En cas de contradiction entre ces textes, les Eurocodes priment.

L'étude du séisme est conduite suivant les dispositions de l'Eurocode 8 et les dispositions de l'arrêté fixant les nouvelles règles applicables aux ponts. L'ouvrage est classé en catégorie d'importance III, pour laquelle le coefficient d'importance est  $\Phi_1=1,2$ . Le coefficient de comportement est pris égal à 1.

Les fondations sont calculées à partir des données géotechniques qui définissent les contraintes au sol admissibles. Ces contraintes au sol et la portance des fondations profondes sont définies dans le rapport géotechnique.

Les calculs dynamiques du tablier sont effectués à l'aide du programme Pythagore, avec une vitesse maximale de  $350 \text{ km/h} \times 1,20 = 420 \text{ km/h}$ .



© Oc'Via

- 6- Le Vistre.
- 7- Coupe transversale Vistre.
- 8- Coupe transversale Sarelle.

- 6- The Vistre.
- 7- Cross section of the Vistre.
- 8- Cross section of the Sarelle.

### SUPERSTRUCTURES ET EQUIPEMENTS

#### JOINTS DE TABLIER

La longueur dilatable de l'ouvrage est inférieure à 90 m et ne nécessite pas de joint garde-ballast sur les culées mobiles.

#### ÉTANCHÉITÉ

Le tablier est revêtu d'un complexe d'étanchéité d'une épaisseur de 30 mm

constitué d'une chape de bitume modifié par élastomère et armé, recouverte d'une deuxième couche en asphalte coulé gravillonné.

#### DRAINAGE DU TABLIER

Le drainage des eaux pluviales est assuré, de chaque côté de l'ouvrage (profil transversal en toit), par les fils d'eau en rives de tablier qui font office de caniveaux à eau et par une corniche-caniveau.

L'eau circule transversalement sous les caniveaux à câbles pour atteindre le fil d'eau.

Le caniveau à eau est couvert par des dalles préfabriquées, pour permettre le passage des pistes latérales.

La continuité de l'assainissement de la section courante et l'exutoire du caniveau à eau sont assurés par les corniches-caniveaux bordant les rives du tablier.

#### PROTECTION VIS-À-VIS DES RISQUES DE PROJECTION DE BALLAST

Les rives de l'ouvrage sont bordées d'écrans acoustiques ayant également une fonction garde-ballast.

#### PROTECTIONS ACOUSTIQUES

Des écrans acoustiques sont disposés sur chacune des rives de l'ouvrage. Ces écrans acoustiques montent à 1 m au-dessus des rails (plan de roulement).

#### ANCRAGE DES POTEAUX PORTE-CATÉNAIRE

La longueur de l'ouvrage impose la présence de poteaux porte-caténaire. Le gabarit latéral des voies permet l'implantation de massifs d'ancrage de poteaux caténaire.

#### MISE À LA TERRE

Les pieux, semelles, piles, culées, murs en retour, la charpente métallique, le tablier et les équipements sont mis à la terre en étant reliés au CDTE de la voie.

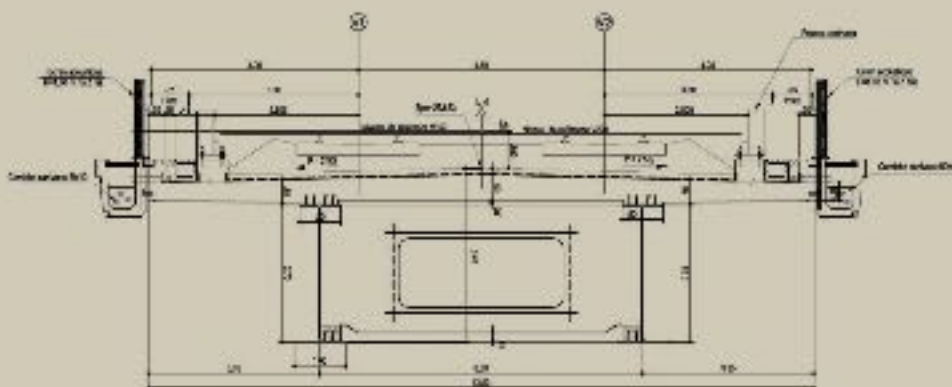
### CARACTÉRISTIQUES ET FONCTIONNEMENT DES OUVRAGES

#### VIADUC DU VISTRE (PRA SC 495-0)

Le tablier est en ossature mixte acier-béton de type bipoutre.

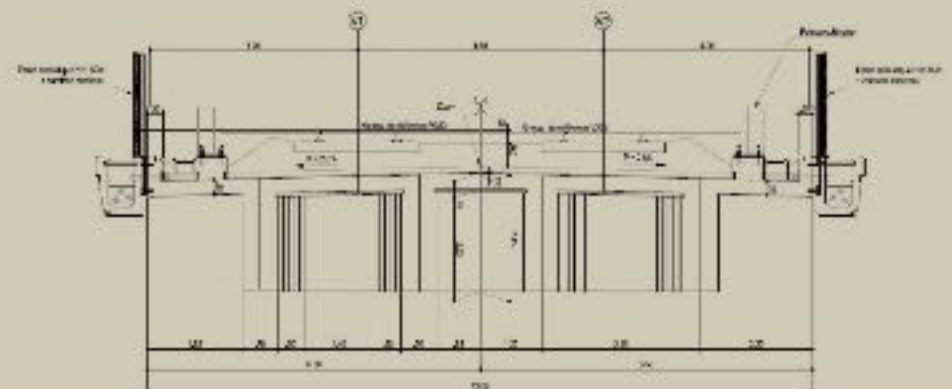
Les deux poutres métalliques ont une hauteur constante de 2,70 m correspondant à un élancement de 1/14,3. Le hourdis supérieur en béton armé a une épaisseur moyenne de 41,5 cm (50 cm au droit des poutres).

#### COUPE TRANSVERSALE VISTRE



7

#### COUPE TRANSVERSALE SARELLE



8

© Oc'Via CONSTRUCTION

© Oc'Via CONSTRUCTION



Le tablier comporte aussi un hourdis inférieur qui repose sur les semelles inférieures des poutres.

Les poutres métalliques sont connectées au béton des hourdis supérieur sur toute la longueur de l'ouvrage et inférieur dans les zones d'appui, à l'aide de goujons.

L'espacement des poutres est de 6,30 m et le hourdis présente un dévers en toit constant de 2,5% (figure 7). La largeur hors tout du tablier de 13 m inclut une piste de 0,75 m de chaque côté, calée au nu de la main courante. Le tablier épouse la clothoïde du tracé. Des diaphragmes de hauteur identique à celle des poutres sont prévus sur chaque appui. Ces diaphragmes suivent le biais de la ligne d'appui. En travée, il est aussi prévu un diaphragme tous les 10 m environ.

**Schéma fonctionnel et conception parasismique**

Longitudinalement : l'unique point fixe est situé sur la pile-culée PC3, appui commun avec l'estacade PRA SC497-0 situé dans le prolongement, tous les autres appuis sont libres de se déplacer longitudinalement. Transversalement, le tablier est bloqué sur la culée C0 et sur la pile-culée PC3.

Toutes les directions libres sont bordées de butées d'arrêt ultime n'entravant pas le libre débattement du tablier sous l'effet du séisme réglementaire.

Les 2 piles courantes du franchissement du Vistre ont fait l'objet d'un traitement architectural et hydraulique. Elles sont constituées de 2 fûts de 2 m de diamètre, sur lesquels repose le chevêtre (figure 9).

**VIADUC DE LA SARELLE (PRA SC 497-0)**

Le PRA SC497-0 franchissement du ruisseau de la Sarelle par la LGV est réalisé par 4 tabliers successifs en béton armé de type quadri-poutre composés de 3 travées continues.

La longueur totale de l'ouvrage entre les axes des culées est égale à 261,05 m. Chaque tablier présente une longueur de 63,80 m entre appuis extrêmes avec la répartition des longueurs de travées suivante : 18,60 m - 26,60 m - 18,60 m.

L'entraxe entre les 2 appuis d'extrémité de deux tabliers élémentaires adjacents est égal à 1,50 m (figure 8).

D'est en ouest, les appuis d'extrémité des tabliers élémentaires de l'estacade sont constitués comme suit :

→ Les appuis d'extrémité du tablier élémentaire de rive Est sont constitués d'une pile-culée biaise



© SPIELMANN ARCHITECTE

- (82,6 gr) conjointe au PRA SC495-0 et d'une pile-culée courante droite ;
- Les appuis d'extrémité des 2 tabliers élémentaires intermédiaires sont constitués de pile-culées courantes droites ;
- Les appuis d'extrémité du tablier élémentaire de rive Ouest sont constitués d'une pile-culée courante droite et d'une culée droite.

Le tablier de l'ouvrage présente une largeur hors tout utile de 13 m, porte les deux voies de la LGV de 4,80 m d'entraxe et en épouse la géométrie du tracé, notamment la clothoïde.

**Schéma statique et conception parasismique**

Horizontalement, chacun des tabliers est doté d'un appui fixe à une extrémité du tablier, généralement une pile-culée, ou une culée pour le tablier le plus à l'est. La longueur dilatable de chacun des tabliers est de 65,30 m (65,15 m pour le tablier le plus à l'ouest). Elle est inférieure à la longueur dilatable admissible sans appareil de dilatation de voie, égale à 90 m.

Transversalement, toutes les piles, culées ou piles-culées appuis sont munis d'un appui fixe constitué, pour chacun d'entre eux, comme suit :

- Point fixe longitudinal : articulation linéaire sur toute la longueur de la ligne d'appui par section de béton rétrécie comprimée par une post-contrainte par barre verticale axée ;
- Autre lignes d'appui : 4 appareils

**9- Vue 3D du futur viaduc du Vistre.**

**9- 3D view of the future Vistre viaduct.**

d'appui à pot disposés au droit de chaque poutre :

- 3 appareils d'appui multidirectionnel,
- 1 appareil d'appui unidirectionnel (fixe transversalement) sous une poutre centrale.

Les piles courantes du viaduc de la Sarelle sont constituées d'un fût plein s'inscrivant dans un rectangle de 1,75 m de largeur par 10,30 m de longueur, avec des coins arrondis de rayon égal à 0,875 m.

Les piles-culées des 2 viaducs sont constituées d'un fût plein s'inscrivant dans un rectangle de 3,25 m de largeur par 10,30 m de longueur, avec des coins arrondis de rayon égal à 0,875 m.

Le chevêtre est équipé des bossages pour appareils d'appui à pot et pour zone de vérinage pour la ligne d'appui libre longitudinalement et d'une section de béton rétrécie pour la ligne d'appui fixe longitudinalement.

L'accès aux appareils d'appui des têtes de pile se fera par nacelle depuis le sol et depuis la plateforme ferroviaire.

**FONDATEMENTS**

Suivant les descentes de charges des appuis et compte-tenu du contexte géologique il est nécessaire de réaliser des fondations profondes qui ont consisté en 2 files de 3 pieux par appui. Les pieux ont un diamètre variant de 1200 à 2000 mm (pile culée PC3, commune au 2 ouvrages), avec des longueurs de forage de 15 à 31 m. Les fondations profondes sont ancrées dans les marnes grises du Plaisancien (figure 10).

**DESCRIPTION DU MODE CONSTRUCTIF**

**RÉALISATION DES FONDATIONS PROFONDES**

Les fondations sont réalisées suivant les techniques des pieux forés sous boue et des pieux à la tarière creuse. Ceci pour maintenir les parois du forage sur la hauteur s'inscrivant dans les graves villafranchiennes qui ont tendance à s'ébouler.

Pour la réception des pieux, un dossier technique est produit contenant notamment le contrôle sonique des pieux et un carottage du fond de pieu par file de pieux (soit 2 par appuis).

La transition entre le fût et les pieux est assurée par une semelle massive parallélépipédique d'environ 2 m de hauteur.

**RÉALISATION DES APPUIS**

Les armatures des piles sont préfabriquées sur site en 2 éléments assemblés ensuite verticalement. Les piles sont bétonnées à la pompe à béton en une seule opération.

Le chantier a pris l'option d'aménager un outil coffrant pour maintenir et régler précisément la position des 19 barres de précontraintes de la ligne d'appui des piles culées. Cet outil évite le réglage des barres depuis l'intérieur de la cage d'armature et sécurise donc cette tâche.

Au sommet de chaque pile, les bossages en béton armé sont réalisés dans le béton. Les appuis à pot supportant les PRS de la charpente métallique reposent directement sur ces platines. (figure 11).

**RÉALISATION DU TABLIER MIXTE**

Une solution mixte métal-béton a été retenue avec deux hourdis en béton armé pour le viaduc du Vistre.

Le hourdis supérieur est coulé en place sur équipement mobile, les entretoises abaissées étant conçues pour faciliter la circulation du coffrage.

**PRINCIPALES QUANTITÉS**

	Viaduc du Vistre	Viaduc de la Sarelle
<b>Béton</b>	<b>2 800 m³</b>	<b>7 100 m³</b>
<b>Dont poutres BA</b>	<b>-</b>	<b>1 350 m³</b>
<b>Armatures</b>	<b>490 t</b>	<b>1 400 t</b>
<b>Pieux</b>	<b>1 575 m³</b>	<b>1 750 m³</b>
<b>Ossatures métalliques</b>	<b>280 t</b>	<b>-</b>



Le hourdis inférieur est préfabriqué, les dalles étant clavées sur les poutres métalliques mais non liaisonnées entre elles.

La charpente métallique du tablier est montée en totalité (87 m) sur la plateforme de lançage, puis viennent la mise en place des PRS (87 m en 2x4 poutres), le soudage des jonctions de poutres, la mise en place des diaphragmes entre PRS, le soudage des diaphragmes sur les PRS (figure 1). Un avant-bec de 20 m est monté pour le lançage ainsi qu'un arrière-bec de 6 m.

Les dalles préfabriquées composant le hourdis inférieur du tablier sont mises en place avec une grue mobile, mais non clavées. Le tablier est ensuite lancé, travée par travée, par l'intermédiaire des chaises disposées en têtes de pile.

À l'issue de la mise en place des appareils d'appuis définitifs, les dalles préfabriquées du hourdis inférieur sont clavées.

Une fois la charpente en position définitive, un équipage mobile est mis en place au niveau de CO afin de couler le hourdis supérieur du viaduc par pia-

**10- Fondations à la tarière creuse.**

**11- Piles du viaduc.**

**10- Foundations by hollow flight auger.**

**11- Viaduct piers.**

notage (ensemble de 8 plots de 11 m environ).

L'ouvrage est conçu de façon à avoir un diaphragme abaissé permettant au plateau central de l'équipage mobile (partie qui coffre la sous-face du hourdis supérieur entre les PRS) de circuler librement d'un côté à un autre du tablier.

**RÉALISATION DU TABLIER QUADRI-POUTRES BÉTON**

Le tablier est supporté par 4 nervures longitudinales en béton armé. Celles-ci sont réalisées sur la zone de préfabrication dédiée du chantier. Elles sont transportées par convoi exceptionnel et montées à la grue mobile sur les appuis. L'entretoise transversale est ensuite coffrée et bétonnée.

Un équipage mobile permet de réaliser le coffrage et le ferrailage du hourdis. Une fois le hourdis réalisé, les 19 barres précontraintes sont mises en tension, ancrant ainsi le tablier sur ses appuis.

**MISE EN ŒUVRE DES SUPERSTRUCTURES ET ÉQUIPEMENTS**

L'étanchéité est mise en oeuvre avec des moyens mécanisés.

Les équipements de cet ouvrage comprennent les caniveaux à eau et à câbles situés en rives du tablier.

La corniche supporte les écrans acoustiques et les caniveaux à eaux.

Les poteaux caténaire sont ancrés dans le hourdis.

Une couche de grave bitume précède la mise en oeuvre du ballast. □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Oc'Via

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Cnm Ingénierie (Setec)

**ENTREPRISE PRINCIPALE :** Oc'Via Construction

**SOUS-TRAITANT MÉTAL :** Baudin Châteauneuf

## PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS

**FONDACTIONS PROFONDES :** Pro-Fond, groupement Francki Fondation, groupement Botte Fondations

**TERRASSEMENTS :** Oc'Via construction

**BUREAUX D'ÉTUDES :** Spie Batignolles Tpci, Bmci

**ARMATURES :** Samt, Sendin

**ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS :** Saph, Matière (poutres BA)

## ABSTRACT

### VIADUCT OVER THE VISTRE AND SARELLE

OLIMIER BLANC, SETEC - CLAUDE BASSETTE, SETEC - LUC DE SAINT PALAIS, SETEC - VINCENT BEAUDOU, BOUYGUES TP

**The Vistre viaduct provides hydraulic transparency for the Vistre plain, in particular crossing the Vistre river and Sarelle stream. Of total length 345 m, it features a combination of two consecutive structures: a structure of the double girder type with a composite steel-concrete frame 87 m long, then a straight structure 261 m long of the four-girder type in reinforced concrete, consisting of four consecutive deck elements. The two structures are joined by a massive abutment pier. The hydraulic and environmental context is very sensitive. The area subject to hundred-year return flooding includes the village of Vestric-et-Candiac and the Source Perrier spring. A sensitive wetland is also passed through. This explains the great length of this crossing. □**

### VIADUCTO DEL RÍO VISTRE Y DEL ARROYO SARELLE

OLIMIER BLANC, SETEC - CLAUDE BASSETTE, SETEC - LUC DE SAINT PALAIS, SETEC - VINCENT BEAUDOU, BOUYGUES TP

**La obra de ingeniería del río Vistre asegura la transparencia hidráulica de la planicie del Vistre, particularmente el cruce del Vistre y del arroyo Sarelle. De una longitud total de 345 m, se caracteriza por la asociación de dos estructuras consecutivas: una estructura de tipo doble viga con armazón mixto acero-hormigón de 87 m seguida de una estructura recta de 261 m de longitud de tipo cuatro vigas de hormigón armado, formada por cuatro tableros elementales consecutivos. Las dos estructuras se han unido con un estribo macizo. El contexto hidráulico y ambiental es muy sensible. La zona inundable en crecida centenaria afecta al pueblo de Vestric-et-Candiac y al manantial Perrier. También se cruza un humedal sensible. Todo esto explica la gran longitud de esta obra. □**



# LE VIADUC DU LEZ ET DE LA LIRONDE

AUTEURS : BENOIT SAUNIER, INGÉNIEUR AU SEIN DU BE DE LA DT, BOUYGUES TP - NICOLAS BERTHE, RESPONSABLE OA AU SEIN DE LA DT INFRA D'OC'VIA CONSTRUCTION, BOUYGUES TP - DOMINIQUE REGALLET, DIRECTEUR TECHNIQUE INFRA D'OC'VIA CONSTRUCTION, BOUYGUES TP - GRÉGORI VILLAIN, CONDUCTEUR DE TRAVAUX AU SEIN DE LA DIRECTION TRAVAUX D'OC'VIA CONSTRUCTION, BOUYGUES TP - IMAD ABI-NADER, INGÉNIEUR, C<sup>2</sup>ODA

LE VIADUC DU LEZ ET DE LA LIRONDE CONSTITUE UN DES OUVRAGES MAJEURS DU CNM. C'EST À LA FOIS LE PLUS LONG DES OUVRAGES NON COURANTS DE LA LIGNE, AINSI QU'UN DES PLUS VISIBLES, EN PLEIN CŒUR DE L'AGGLOMÉRATION MONTPELLIÉRAINE. SA CONCEPTION A ÉTÉ DICTÉE PAR DE FORTES CONTRAINTES HYDRAULIQUES, AVEC LE FRANCHISSEMENT DE DEUX COURS D'EAU, AINSI QUE PAR UNE VOLONTÉ D'EN FAIRE UN OUVRAGE EMBLÉMATIQUE ET ESTHÉTIQUE.



1  
© Oc'Via

## UN OUVRAGE MAJEUR DU CNM

Les ouvrages de franchissement des rivières du Lez et de la Lironde, situés sur la commune de Lattes, dans la périphérie sud-est de Montpellier, s'étendent sur près de 600 m et forment ainsi le plus grand Ouvrage d'Art Non Courant du projet CNM (figure 1).

Trois types de structures de tablier sont réalisés : un viaduc mixte, une estacade en béton armé et un bow-string métallique. Les raisons de ce choix sont les suivantes :

- Les deux rivières le Lez et la Lironde sont distantes de près de 520 m ;
- La large braise du Lez est d'environ 80 m, celle de la Lironde d'environ 30 m ;
- Plusieurs voies de circulation doivent être franchies :

- La RD21E qui longe la Lironde,
- La RD21 qui est une 2x2 voies avec terre-plein central supportant 2 voies de tramway,
- La RD58 qui longe le Lez ;

→ L'écoulement du Lez doit être pleinement préservé et aucun appui intermédiaire n'est autorisé dans le lit de la rivière, ce qui nécessite une travée isostatique de 90 m ;

→ Des accès libres doivent être aménagés le long de chacune des berges pour leur entretien futur ;

→ Des contraintes hydrauliques obligent à ne créer aucun obstacle à l'écoulement des eaux en cas de crue des rivières, notamment lors des épisodes de pluie dits « cévenols » en période automnale.

Pour le franchissement du Lez, le fait de devoir concevoir une travée isostatique

de 90 m ne permettait pas la mise en œuvre d'un bipoutre mixte (gamme de portée trop importante). Trois alternatives ont été imaginées : un quadripoutre mixte, un tablier de type Warren, et un tablier de type bow-string. L'alternative quadripoutre mixte est vite abandonnée pour des raisons économiques. En parallèle, les élus de la Communauté d'Agglomération de Montpellier souhaitent une solution architecturalement élégante. C'est finalement la solution bow-string qui est retenue.

1- Plan de situation de l'ouvrage.

1- Location drawing of the structure.

## PRINCIPALES DONNÉES FONCTIONNELLES

L'ouvrage de franchissement doit supporter deux voies LGV circulant à une vitesse de conception de 350 km/h. L'entraxe des deux voies est de 4,80 m, à l'exception des 150 premiers mètres côté Lironde (côté future gare de Montpellier), où l'entraxe varie de 4,8 m à 7,94 m. Le profil en long admet une pente uniforme de 0,15 %, le point haut étant situé côté Lironde. Le tracé en plan est en alignement droit sur quasiment tout le linéaire de l'ouvrage. Le gabarit sous tablier au droit des voies de circulation franchies est de 5,40 m au maximum.

## CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

L'ouvrage, d'une longueur totale de 576,4 m comptée entre les axes d'appui des culées C0 et C16, se subdivise en trois sous-ensembles :

→ Côté Lironde : le viaduc de type mixte entre C0 et PC4, de 180 m de longueur, avec quatre travées (39 m - 2 x 51 m - 39 m) ;

→ En partie centrale, une succession de quatre estacades en béton armé :

- Estacade 1 : de PC4 à PC6, avec deux travées (2 x 28 m),
- Estacade 2 : de PC6 à PC9, avec trois travées (3 x 28 m),
- Estacade 3 : de PC9 à PC12, avec trois travées (3 x 28,5 m),
- Estacade 4 : de PC12 à PC15, avec trois travées (28,5 m - 31,4 m - 21 m) ;

→ Côté Lez : le viaduc de type bow-string entre PC15 et C16, de 90 m de longueur, en travée isostatique.

## ORGANISATION DES ÉTUDES

Les études d'exécution ont été confiées à un groupement d'entreprises, composé comme suit :

- Artes, basé à Montpellier, en charge des études des appuis et des tabliers en béton armé des quatre estacades ;
- C<sup>2</sup>oda, basé à Paris, en charge des études des tabliers mixtes du Lez et de la Lironde ;
- Otce, en charge de la mission de contrôle interne.

Ces études sont supervisées par la Direction Technique Infrastructures.

## DESCRIPTION DES OUVRAGES

### LES APPUIS

L'ensemble des appuis est réalisé en béton armé.

De façon générale, chacune des piles (piles courantes et piles culées) est constituée par :

- Des pieux de diamètre 1,2 m ;
- Une semelle rectangulaire ;
- Un fût de pile (figure 2) :
  - Formé de deux fûts circulaires pour les piles P1, P2 et P3,
  - De section « rectangulaire » pour les autres piles.



2 © Oc'Via

Les culées sont constituées d'un complexe sommier + mur garde-grève + mur de front reposant sur une semelle, elle-même fondée sur pieux. Des murs en retour et des murs caches sont également prévus.

Tous les appuis sont biais, hormis la pile culée PC9 :

- Biais de 56° côté Lez (entre P10 et C16) ;
- Biais de 62° côté Lironde (entre C0 et P8).

### LES TABLIERS

#### Bipoutre mixte

L'ouvrage est de type bipoutre mixte acier béton composé de deux poutres métalliques reliées entre elles par des diaphragmes (figure 3). La hauteur des poutres varie de 2,65 m au droit des culées à 3,50 m au droit des piles avec une zone de transition linéaire à l'approche des piles des travées de rive (critères de gabarit routier au droit des voies franchies), leur entraxe est

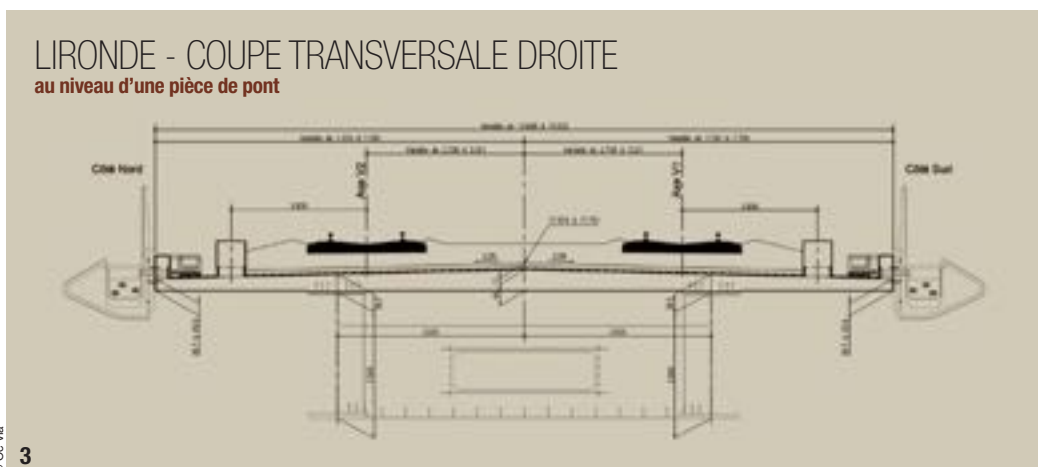
de 7,87 m constant sur la longueur de l'ouvrage. Les poutres sont surmontées d'un hourdis supérieur en béton armé d'épaisseur variable. Afin de limiter la déformation en torsion sous chargement dissymétrique, mais aussi de respecter les critères réglementaires sous chargement dynamique, un contreventement inférieur est réalisé au moyen de dalles préfabriquées en béton armé, de 17 cm d'épaisseur (figure 4). Ces dalles constituant le hourdis inférieur sont liées aux membrures inférieures des poutres métalliques par des longrines coulées en place, qui enrobent des goujons de connexion soudés sur celles-ci. Aucune continuité de ces dalles n'est assurée dans le sens longitudinal, elles sont simplement juxtaposées. Elles ne participent donc pas à la résistance du tablier vis-à-vis de la flexion longitudinale, mais contribuent à la raideur en torsion de la section transversale.

#### Estacades

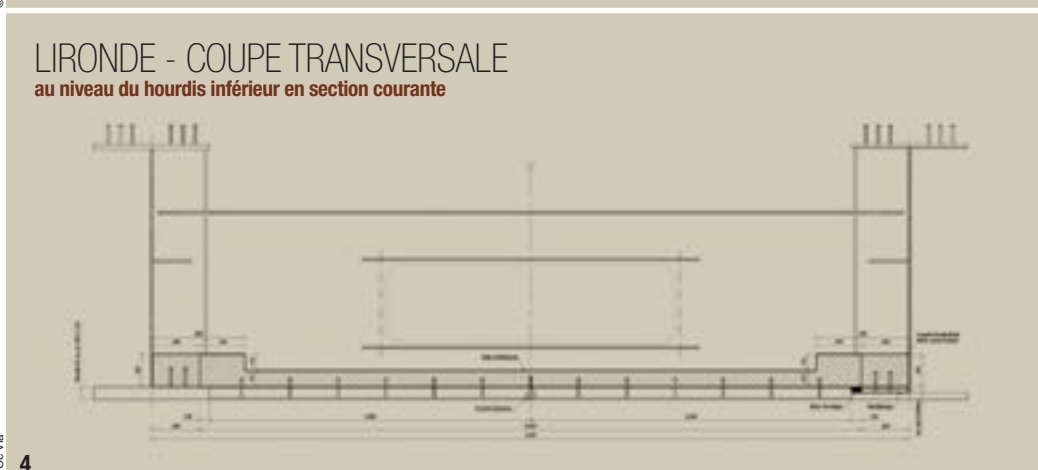
Le tablier des quatre estacades est un tablier en béton armé constitué de quatre poutres et d'un hourdis supérieur. Les poutres sont préfabriquées, leur entraxe est fixé à 3,10 m/2,40 m /3,10 m. ▷

- 2- Piles de l'estacade du Lez.
- 3- Lironde - Coupe transversale droite au niveau d'une pièce de pont.
- 4- Lironde - Coupe transversale au niveau du hourdis inférieur en section courante.

- 2- Piers of the Lez jetty.
- 3- Lironde - Straight cross section at the level of a crosspiece.
- 4- Lironde - Cross section at the level of the lower slab in a standard section.



3 © Oc'Via



4 © Oc'Via



Elles admettent une retombée de 2,38 m, pour une largeur d'âme de 70 cm. Le hourdis admet une épaisseur constante de 37 cm (dalles préfabriquées d'épaisseur 12 cm + partie coulée en place). Une entretoise coulée en place est prévue au droit de chacun des appuis (figure 5).

**Bow-string**

L'ouvrage est de type bow-string composé de deux arcs en caissons avec tirants inférieurs en caissons et suspentes métalliques, reliés entre eux par des pièces ponts courantes et d'abouts (figure 6). Les arcs sont espacés de 15,05 m constant, et ont une hauteur de 17,5 m à la clé. Les dimensions du caisson constituant chaque arc est variable : on passe d'une section de 1,5 m de large par 2,7 m de haut au droit de la jonction tirant/arc, à une section de 2,6 m de large par 1,5 m de haut à la clé. Les deux arcs sont reliés entre eux par trois butons de diamètre extérieur 914 mm. Les suspentes (six

paires par arc) sont des barres de 180 mm de diamètre, implantées de manière rayonnante avec un espacement de 6 m au niveau du tablier.

Elles sont ancrées en partie basse et en partie haute à la structure par un système de chapes et d'axes. Les tirants sont en caisson de section constante 1,5 m de large par 2,4 m de haut. Les deux tirants sont reliés entre eux :  
 → En zone courante de l'ouvrage par des pièces de pont mixtes en I espacés d'environ 3 m ;  
 → Aux abouts par des pièces de pont mixtes en caissons métalliques de 1,8 m de large par 0,925 m de haut. Le tablier est constitué par un hourdis en béton armé connecté aux quatre longerons situés sous les rails et reportant les charges sur les pièces de pont.

**DÉTAILS DE CONCEPTION**

**BIPOUTRE MIXTE (figure 7)**

Les études en phase de service ont été effectuées avec un modèle grill

de poutres ST1 couplé avec le logiciel interne MIXCOD développé par C<sup>2</sup>oda, permettant l'analyse selon les Eurocodes des poutres mixtes. Les études dynamiques du tablier sous le passage

de convois HSLM ont été menées avec le logiciel Scia Engineering de Nemetschek avec un modèle filaire et des arêtes de poisson permettant de représenter la position exacte des appareils d'appuis.

Pendant le lancement l'ouvrage sera équipé de prédalles inférieures préfabriquées non connectées pendant les diverses phases provisoires afin de ne pas générer des contraintes dans le béton.

Le poids des prédalles est considéré pendant toutes ces phases.

Certains éléments ont nécessité des études et des mises au point de la géométrie de l'ouvrage afin de permettre le bon déroulement de la phase de lancement :

→ Modification de la géométrie des poutres prévues initialement à variation de hauteur parabolique, en poutres à variation de hauteur linéaire (ce qui permet aux équipes travaux de disposer de dalles pré-

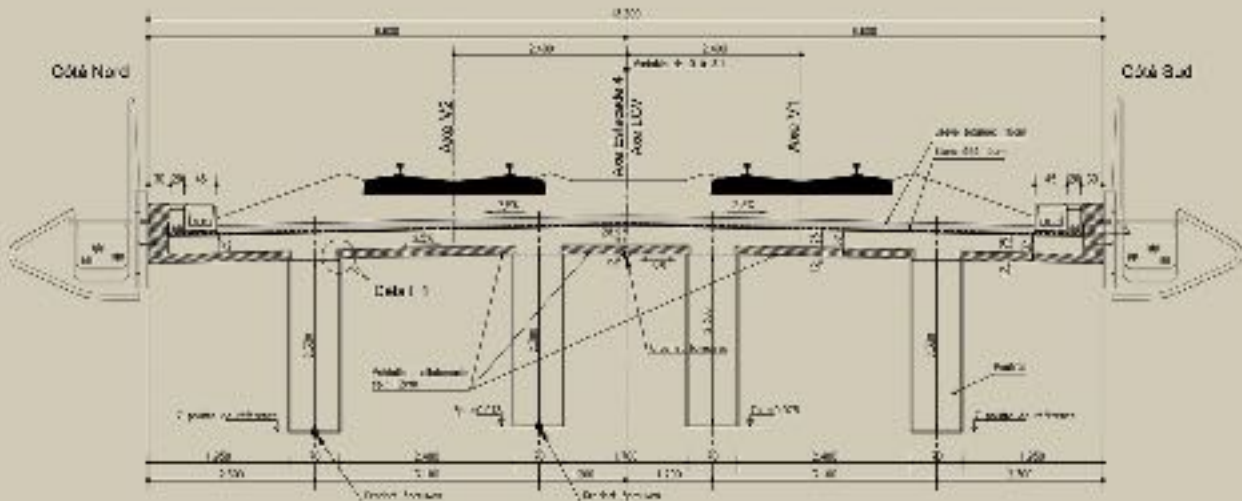
**5- Estacades - Coupe transversale droite entre appuis.**

**6- Bow-string - Coupe longitudinale dans l'axe de l'ouvrage.**

**5- Jetties - Straight cross section between supports.**

**6- Bowstring girder - Longitudinal section in the centreline of the structure.**

ESTACADES - COUPE TRANSVERSALE DROITE ENTRE APPUIS

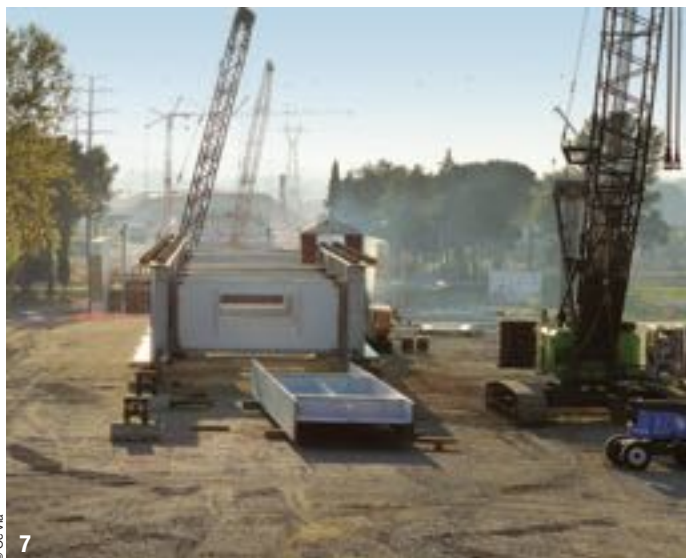


5 © Cc'Via

BOW-STRING - COUPE LONGITUDINALE DANS L'AXE DE L'OUVRAGE



6 © Cc'Via



7- La charpente métallique de la Lironde.  
 8- Phase de lançage avec 102 m - Exemple phase Lancecod.  
 9- Exemple cas sortie déplacement.

7- The steel frame of the Lironde viaduct.  
 8- Launching phase with 102 m - Example of Lancecod phase.  
 9- Example of case of movement release.

fabriquées inférieures à géométrie plane) ;  
 → Modification du tracé des poutres en les rendant parallèles, afin de simplifier la fabrication des pièces de pont (éléments rectangulaires et non plus à géométrie trapézoïdale) et de rendre constante la largeur des dalles préfabriquées (ce qui permet d'utiliser un équipement mobile constant entre les deux poutres et seulement des encorbellements à ajuster par l'ajout d'un coffrage supplémentaire à l'intérieur du gabarit général du coffrage) ;  
 → Calcul de la mise en place du tablier en prenant en compte les contraintes du site, notamment l'obligation de lancer avec des variations de hauteur de poutres nécessitant des phasage de déblocage de certains appuis avec des charges lancées non négligeables (calcul approché par un logiciel de lançage interne Lancecod et complété par un modèle en grill de poutres ST1 ainsi que par un modèle Scia Engineering afin de valider le non déversement des poutres principales) ;

→ Calcul des éléments transversaux avec un modèle complet aux éléments finis afin d'aborder l'effet du biais et ainsi optimiser la conception des pièces de pont abaissées et non connectées à la dalle supérieure y compris dans les zones sur piles et culées (permet la sortie de l'équipage mobile aux abouts) ;  
 → Calcul des prédalles préfabriquées inférieures avec un modèle aux éléments finis afin de mieux cerner et optimiser la connexion de ces éléments avec les semelles inférieures des poutres principales.

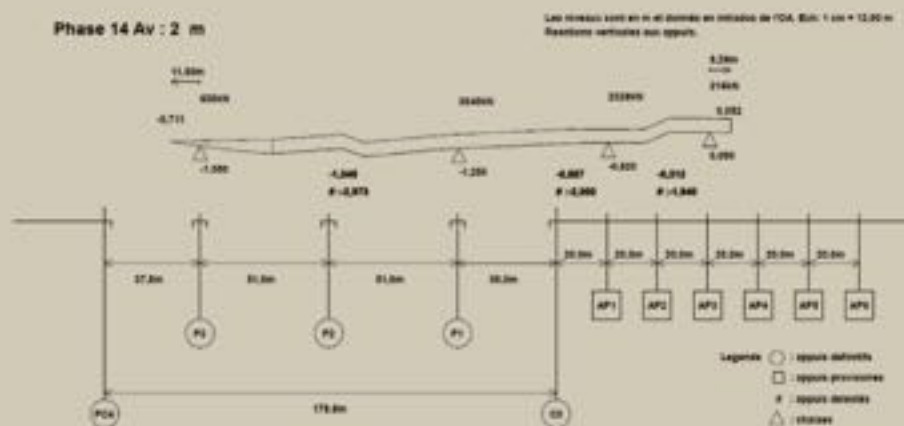
Le phasage de lançage dans les zones de variation de hauteurs nécessite d'enlever les chaises dans ces zones, d'où l'obligation de franchir des longueurs égales au double des plus grandes travées centrales. À l'issue de mises au point avec le charpentier et les équipes travaux, le phasage retenu pour la mise en place de l'ouvrage est le suivant (figure 8).

**BOW-STRING**

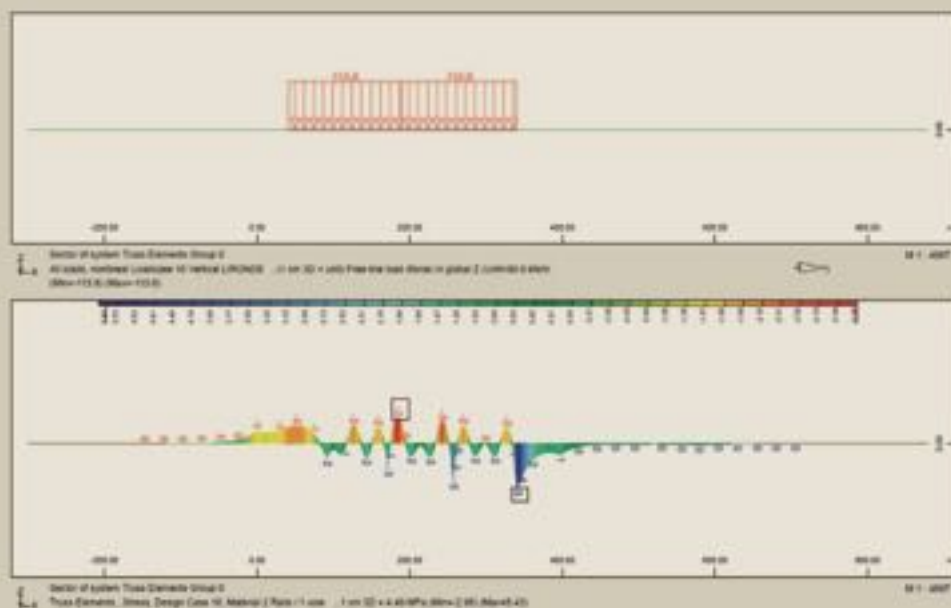
Certains points ont nécessité des études ou des mises au point un peu plus poussées :

→ Amélioration de la rigidité de certaines pièces de pont d'about pour diminuer les accélérations dans les zones d'approche (entrée de l'ouvrage) ;

PHASE DE LANÇAGE AVEC 102 M - EXEMPLE PHASE LANCECOD



EXEMPLE CAS SORTIE DÉPLACEMENT



© Oc'Via

© Oc'Via

© Oc'Via



- Modification de la hauteur de la section du tirant pour optimiser les sections tout en améliorant la rigidité d'ensemble ;
- Calcul de la stabilité de l'ouvrage avec une analyse non linéaire menée avec le logiciel Scia Engineering ;
- Calcul de la phase de lançage avec une analyse non linéaire pour le soulèvement des appuis ainsi que la stabilité de l'ouvrage menée avec le logiciel Sofistk ;
- Les études dynamiques du tablier ont nécessité une certaine itération afin de trouver la meilleure rigidité pièces de pont/tirant pour respecter les critères d'accélération (figure 9).

Une étude fine a permis d'optimiser la structure en la rigidifiant, notamment les tirants par augmentation de leur hauteur (passage de 2 m à 2,4 m) ; ceci a permis d'augmenter de manière considérable les inerties tout en gardant la même quantité de soudures et de poids de métal.

Les études de stabilité globale ont été menées pour le non flambement des arcs constituant le bow-string. Ont été déterminés en première étape les coefficients d'éloignement critique  $\alpha_{cr}$  sous différentes combinaisons ELU. Un coefficient d'éloignement critique minimal  $\alpha_{cr} = 8,51$  a été obtenu pour le premier mode de flambement des arcs (figure 10). Pour la suite de l'étude et dans un but d'optimisation, on a

**10- 1<sup>er</sup> mode de flambement des arcs.**

**11- Géométrie de l'ouvrage lancé avec un avant bec de 60 m.**

**12- Niveaux et positions des chaises au lançage.**

**13- Exemple de sortie avant accostage.**

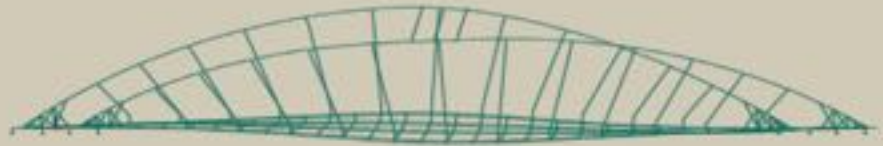
**10- First arch buckling mode.**

**11- Geometry of the structure launched with a 60-metre launching nose.**

**12- Levels and positions of temporary roller bearings at launching.**

**13- Example of release before docking.**

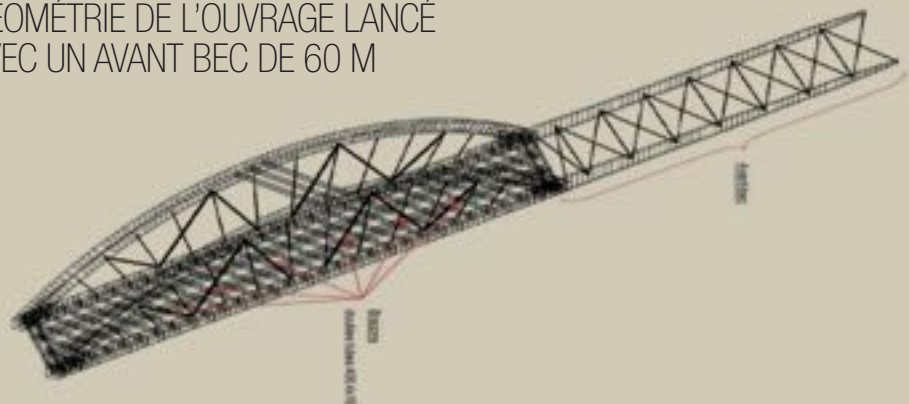
### 1<sup>er</sup> MODE DE FLAMBEMENT DES ARCS



10

© Oc'Via

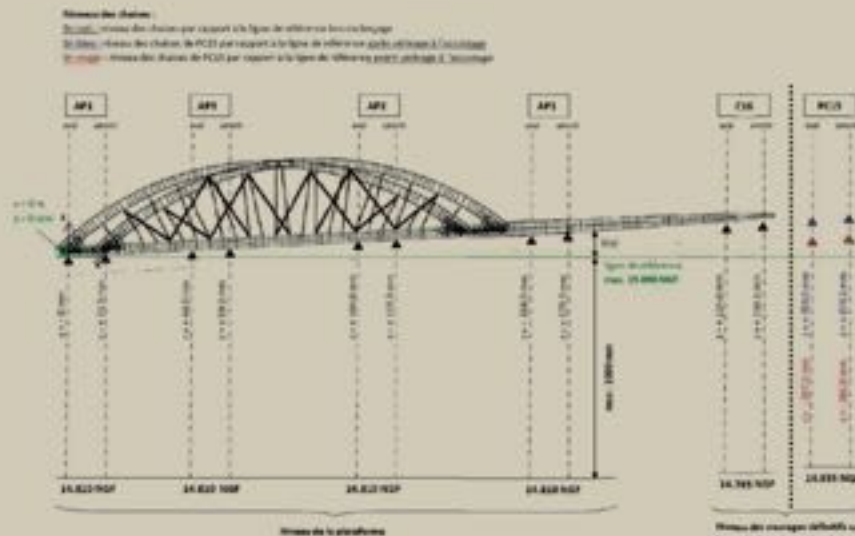
### GÉOMÉTRIE DE L'OUVRAGE LANCÉ AVEC UN AVANT BEC DE 60 M



11

© Oc'Via

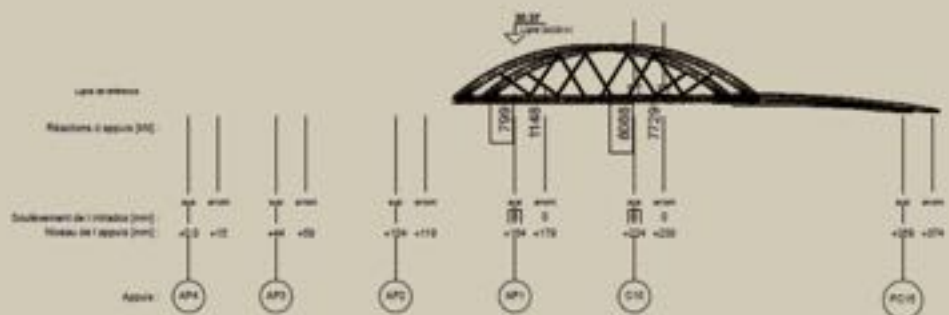
### NIVEAUX ET POSITIONS DES CHAISES AU LANÇAGE



12

© Oc'Via

### EXEMPLE DE SORTIE AVANT ACCOSTAGE



13

© Oc'Via

## DESRIPTIF DES TRAVAUX

### PLANNING

Les travaux de construction ont débuté en janvier 2014 et se termineront en décembre 2015. Les travaux de fondations profondes ont débuté en février 2014 et se sont achevés en septembre 2014. Concernant les travaux de génie civil, les 17 appuis du viaduc ont été réalisés de mars 2014 à décembre 2014. Les tabliers y compris équipements sont, quant à eux, réalisés de janvier 2015 à décembre 2015.

### APPUIS

L'ensemble des pieux a été réalisé selon la technique du forage à la boue. L'ensemble des appuis (semelles et fûts) est réalisé à l'aide de banches métalliques B07 associées à des vaux bois et métal permettant d'obtenir les formes architecturales souhaitées.

### TABLIERS

Le tablier du bipoutre est réalisé à l'équipage mobile. Les poutres des tabliers des estacades sont préfabriquées in situ à l'aide de deux outils de coffrage hydrauliques. Les prédalles sont fabriquées en usine. Les prédalles du tablier du bow-string, en raison de leurs dimensions et pour des raisons de transport, sont préfabriquées in situ également.

### JALONS À RESPECTER

Le viaduc du Lez/Lironde se trouve sur le chemin critique, trois étapes significatives ont été identifiées et constituent des jalons à l'avancement.

- 1<sup>er</sup> lançage du bipoutre : mi-décembre 2014.  
Ce lançage nécessitera la coupure de la voirie RD21e6 - Avenue des platanes. Cette opération est réalisée de jour.
- 2<sup>nd</sup> lançage du bipoutre : mi-février 2015.  
Ce lançage nécessite la coupure des voiries RD21e6 - Avenue des platanes, RD21 - Avenue Georges Frèche et la consignation électrique de la plateforme tramway. Cette opération est réalisée de nuit avec un créneau 22h - 6h pour la partie voirie et une fenêtre réduite 1h-5h pour passer au-dessus du tramway.
- Lançage du bow-string : mai 2015  
Ce lançage nécessite la consignation électrique de la ligne haute tension 225 kV Montpellier-St Christol Z Pont Trinquat et Tamareau-Saumade. En effet, pendant le lançage, les arcs du bow-string interceptent les câbles inférieurs de RTE. De ce fait, ces câbles sont déposés avant lançage et remis en place après. S'agissant d'une opération d'envergure, la date de consignation a été programmée un an à l'avance et représente le grand défi du viaduc.

choisi d'effectuer un calcul au second ordre en incluant les imperfections géométriques.

Le lançage du tablier a été défini en respectant des contraintes de site non négligeables :

- Impossibilité de mise en place de palée provisoire dans le lit du Lez ;
- Largeur réduite de plateforme avec des réductions des charges limites à proximité du bord de talus ;
- Contrainte de gabarit vu la présence de lignes électriques à 2 m du sommet des arcs.

Plusieurs idées ont été imaginées :

- Lançage avec mise en place de

chaises provisoires sur la plateforme de lançage et lançage sur des chaises à double balancier couplé pour suivre les rotations des sections du tirant vu le biais ;

- Lançage avec kamags pour avancement jusqu'à la phase déséquilibre maximal, puis rajout de chaise sur culées pour continuer le lançage.

Le fait de franchir 90 m a nécessité la conception d'un avant bec spécifique pouvant encaisser des moments aux ELU au niveau des attaches de l'ordre de 60 MN x m, avec des sections d'avant bec de hauteur 4 m aux extrémités (figures 11 à 12). □

## CHIFFRES PRINCIPAUX

**194** pieux de diamètre 1,2 m et de longueur variant de 25 à 30 m

**2** culées, 10 piles, 5 piles culées

**15 000** m<sup>3</sup> de béton (hors béton des pieux)

**2 600** t d'armatures HA (hors armatures des pieux)

**7 800** m<sup>2</sup> de tablier

**2 400** t de charpente métallique (bipoutre : 800 t / bow-string : 1 600 t)

**44** poutres en béton armé, d'une longueur moyenne de 25 m

**1 160** m de corniches caniveaux et écrans acoustiques

**PERSONNEL** : 10 compagnons pour les fondations profondes, 25 pour la partie génie civil, 15 à 20 armaturiers pour la pose des armatures, soit environ 55 ouvriers sur le site

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE** : Oc'Via

**MAÎTRE D'ŒUVRE** : Oc'Via Ingénierie

**ENTREPRISES** :

- Travaux de fondations : Spie Fondations
- Travaux de génie civil : Oc'Via Construction
- Fourniture et pose des armatures : Samt

## ABSTRACT

### LEZ AND LIRONDE VIADUCT

BENOIT SAUNIER, BOUYGUES TP - NICOLAS BERTHE, BOUYGUES TP - DOMINIQUE REGALLET, BOUYGUES TP - GRÉGORI VILLAIN, BOUYGUES TP - IMAD ABI-NADER, INGÉNIEUR, C<sup>2</sup>ODA

**This viaduct is the longest linking structure on the line, crossing the two rivers of the Lez and the Lironde. The structure comprises 17 reinforced concrete supports, all mounted on pile foundations of diameter 1.2 m and length exceeding 20 m. The deck, divided up into six sections, has three different types of structure: composite steel-concrete double girder (length 180 m), four reinforced concrete quadri-girder jetties (total length 306.4 m), and a steel bowstring girder (length 90 m). The launching operations for the steel decks, especially the bowstring girder due to its span, required special tools and represent key milestones in the success of this project. The construction works will last two years.** □

### VIADUCTO DEL LEZ Y DEL LIRONDE

BENOIT SAUNIER, BOUYGUES TP - NICOLAS BERTHE, BOUYGUES TP - DOMINIQUE REGALLET, BOUYGUES TP - GRÉGORI VILLAIN, BOUYGUES TP - IMAD ABI-NADER, INGÉNIEUR, C<sup>2</sup>ODA

**Este viaducto es la obra de ingeniería no corriente más larga de la línea, que atraviesa los ríos Lez y Lironde. La estructura incluye 17 apoyos de hormigón armado sobre pilotes de 1,2 m de diámetro y una longitud superior a 20 m. El tablero, cortado en seis tramos, presenta tres tipos de estructura diferentes: una doble viga mixta acero-hormigón (longitud 180 m), cuatro estacades de cuatro vigas de hormigón armado (longitud total 306,4 m) y un bow-string metálico (longitud 90 m). Las operaciones de lanzamiento de los tableros metálicos, particularmente el bow-string debido a su luz, requirieron la utilización de herramientas específicas y constituyen hitos clave para el éxito de este proyecto. Las obras de construcción durarán 2 años.** □





1

© Oc'Via Y. BROSSARD

# LA TRANCHÉE COUVERTE DE MANDUEL

AUTEURS : FRANÇOIS PETIT, CONDUCTEUR DE TRAVAUX AU SEIN DE LA DIRECTION TRAVAUX D'OC'VIA CONSTRUCTION, BOUYGUES TP - ALAIN BLANC, RESPONSABLE DE LA TC DE MANDUEL AU SEIN DE LA DIRECTION TRAVAUX D'OC'VIA CONSTRUCTION, SPIE BATIGNOLLES TPCI - NICOLAS BERTHE, RESPONSABLE OA AU SEIN DE LA DT INFRA D'OC'VIA CONSTRUCTION, BOUYGUES TP

SITUÉE AU NIVEAU DU RACCORDEMENT FRET DE LA LIGNE, SUR L'EXTRÉMITÉ EST DE LA LIGNE, LA TRANCHÉE DE MANDUEL CONSTITUE UN DES DÉFIS MAJEURS DU CHANTIER. SA CONSTRUCTION SE DÉROULE EN EFFET SOUS UN FAISCEAU FERROVIAIRE, AVEC DES POSSIBILITÉS D'INTERRUPTION DU TRAFIC TRÈS LIMITÉES. ELLE A ÉGALEMENT LIEU DANS UN ENVIRONNEMENT SENSIBLE, AVEC UNE NAPPE PHRÉATIQUE TRÈS PROCHE DE LA SURFACE.

## UN OUVRAGE CONÇU POUR RÉPONDRE À DES CONTRAINTES FERROVIAIRES ET ENVIRONNEMENTALES

### LE FRANCHISSEMENT INFÉRIEUR D'UN FAISCEAU FERROVIAIRE

Du fait de la mixité du CNM, il est nécessaire de créer un raccordement entre la ligne fret classique et la future ligne. C'est dans ce cadre que la tranchée couverte de Manduel est réalisée, puisqu'elle permet le franchissement d'un faisceau ferroviaire constitué de 2 voies LGV et 2 voies classiques par ce raccordement fret (figure 2).

Un franchissement de ce faisceau par viaduc a également été étudié. Cependant, la réduction des nuisances grâce à un passage souterrain a été appréciée par les acteurs du territoire et a conduit au choix de cette solution en tranchée.

### UN OUVRAGE DE FRANCHISSEMENT PARTIELLEMENT COUVERT

La tranchée de Manduel, qui mesure 1 200 m, est constituée :

→ D'une tranchée couverte d'environ 100 m, permettant le passage sous le faisceau de lignes classiques et TGV (figure 3) ;

### 1- Vue aérienne du ripage.

### 1- Aerial view of skidding.

→ D'une tranchée ouverte de deux fois 550 m, formant les rampes de descente et de sortie de la tranchée (figure 4) ;

→ D'une station de pompage, destinée à extraire les eaux de ruissellement s'accumulant au point bas de la tranchée.

Les principales contraintes pour la réalisation de cet ouvrage concernent le maintien de la circulation ferroviaire.

Ainsi, le chantier ne dispose-t-il que de deux week-ends d'interruption de circulation pour les travaux.

En outre, il est prévu environ 7 mois de ralentissement de circulation pour l'exécution des travaux structurels en sous-œuvre.

Des contraintes environnementales ont également un impact fort sur le projet, notamment en termes de transparence hydraulique de l'ouvrage.



## TRACÉ DE LA TRANCHÉE DE MANDUEL



### Caractéristiques de l'ouvrage

Longueur: **1 200 m**  
 Franchissement souterrain de :  
 - La LGV Méditerranée et de la ligne Tarascon / Sète  
 - La RD3  
 - La route de Jonquières (accès future gare)

### Chiffres clés

**51 000 m<sup>3</sup>** de béton  
**4 350 tonnes** d'acier  
**110 000 m<sup>3</sup>** de déblai (ou terrassement)

### Calendrier de la construction

Démarrage des travaux: **novembre 2013**  
 Fin du génie civil: **automne 2015**

© KFH 2

### UN CONTEXTE GÉOLOGIQUE À PRENDRE EN COMPTE

Le site de la tranchée de Manduel se situe sur le plateau des Costières, à l'est de Nîmes. Le sous-sol est constitué d'alluvions du Villafranchien comprenant une forte proportion de galets et graviers dans une matrice argilo-sableuse, sur une épaisseur d'environ 11 m, puis d'un faciès astien marnoso-siltieux d'environ 1 à 2 m recouvrant un faciès argilo-marneux gris, substratum du site.

La nappe phréatique est rencontrée à environ 3 m de profondeur.

Dans ce contexte, il est nécessaire d'ancrer les parois moulées et le jet

2- Tracé de la tranchée de Manduel.

3- Coupe de la tranchée couverte.

4- Coupe de la tranchée ouverte.

2- Alignment of the Manduel cut-and-cover.

3- Cross section of cut-and-cover tunnel.

4- Cross section of open-cut excavation.

grouting dans les marnes grises, afin de garantir les fiches mécaniques et hydrauliques indispensables à l'ouvrage. De ce fait, il faut réaliser ces structures sur environ 15 m de profondeur.

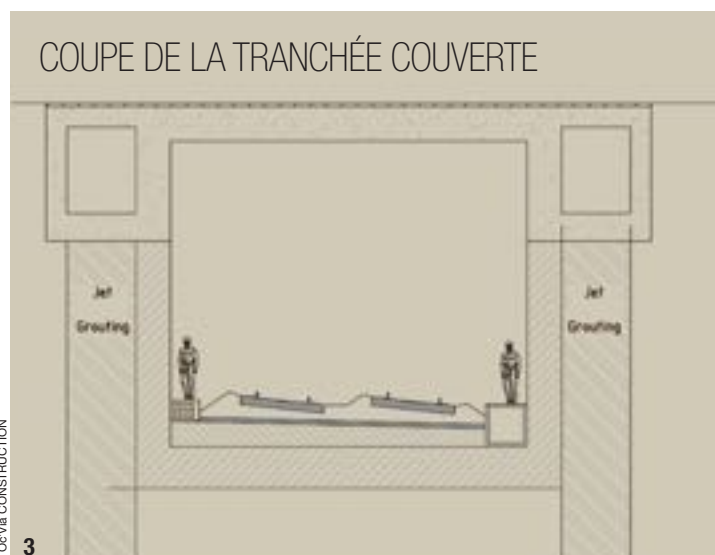
### LES TRAVAUX DE LA PARTIE COUVERTE DE L'OUVRAGE

#### MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE POUR DES TRAVAUX EFFECTUÉS SOUS DES VOIES CIRCULÉES

Dans sa partie couverte, la tranchée

peut être décrite comme un cadre avec une dalle de couverture, deux piliers et un radier. Afin de limiter au maximum l'impact de la réalisation de la tranchée sur la circulation ferroviaire, il a été décidé, en concertation avec la SNCF et RFF, de préfabriquer la dalle de couverture et de la mettre en place sous les lignes ferroviaires lors de week-ends d'interruption de circulation. Par la suite, les piliers et radiers peuvent alors être réalisés en sous-cœuvre sous circulation ferroviaire.

### COUPE DE LA TRANCHÉE COUVERTE



### COUPE DE LA TRANCHÉE OUVERTE



© CeVia CONSTRUCTION 3

4





5

© Oc'Via Y. BROSSARD

Cela implique de réaliser un blindage étanche des parois de terrassement lors de l'excavation en taube sous la dalle. C'est la technique du jet grouting qui a été retenue pour ce blindage. Deux galeries latérales ont donc été ajoutées à la dalle à ripper. Elles servent de galeries techniques depuis lesquelles les colonnes de jet grouting sont réalisées, sous circulation ferroviaire, avant le début de l'excavation en taube. Ce blindage en jet grouting, qui a également pour fonction de soutenir la dalle de couverture de la tranchée le temps de la réalisation du reste du cadre, reste cependant un ouvrage provisoire, puisque le cadre est dimensionné à terme comme un ouvrage posé en fondation superficielle sur son radier.

## LE RIPAGE DES OUVRAGES SOUS LES VOIES

### UNE ANTICIPATION EN COORDINATION AVEC RFF ET SNCF

Le ripage, réalisé par Oc'Via Construction, a également nécessité le concours de la SNCF et de RFF pour respectivement garantir que les travaux étaient préparés et réalisés de manière à garantir la libération, en sécurité et à l'heure, des lignes ferroviaire ; organiser les mesures de substitution pour les trains impactés.

Les deux ouvrages Nord et Sud ont ainsi été ripés respectivement les week-ends du 6 au 8 septembre 2014 et du 18 au 22 septembre 2014, lors d'opérations de 60 heures et 81 heures.

Ces créneaux avaient été préalablement étudiés afin de limiter au maximum la

gêne aux usagers. Ainsi, la coupure du 6 septembre 2014 n'occasionnait-elle que très peu de gêne puisqu'une seule des voies TGV était coupée. De ce fait, les trains circulant sur la voie coupée pouvaient, au droit du chantier, circuler à contre-sens sur l'autre voie TGV. L'impact voyageurs de la deuxième opération était plus marqué, puisqu'une

**5- Ripage avec Kamags.**

**6- Jet grouting.**

**5- Skidding with Kamags.**

**6- Jet grouting.**



© Oc'Via

6

voie TGV ainsi que les deux voies de la ligne classique Tarascon-Sète étaient impactées.

Les trains étaient donc, soit déviés sur d'autres lignes, soit remplacés par des bus, soit supprimés.

RFF et SNCF ont géré le dispositif d'information des usagers, sur la nature des travaux en cours et leurs conséquences sur la circulation ferroviaire.

### Une préparation technique minutieuse des opérations de ripage

D'un point de vue technique, les opérations de ripage ont été préparées plusieurs mois à l'avance.

Dans un premier temps, un rabattement de nappe a été réalisé afin de pouvoir préfabriquer les ouvrages directement dans une fouille à l'altimétrie finale, afin que le ripage se fasse à l'horizontale. Compte tenu de la disposition des voies du faisceau ferroviaire à construire, laissant un espace important entre une voie LGV d'une part et l'autre voie LGV et les deux lignes classiques d'autre part, deux ouvrages préfabriqués ont été construits de part et d'autre du faisceau ferroviaire. Il s'agit d'ouvrages de respectivement 40 et 50 m de long, 17 m de large, 4 m de haut pour environ 1500 m<sup>3</sup> de béton et 300 t d'armatures.

Par ailleurs, la plateforme SNCF a également été préparée pour le ripage. On peut ainsi citer des déplacements de poteaux caténaires en dehors de l'emprise du ripage, le prédécoupage des rails, le transfert des réseaux de la plateforme sur chemin de câble suspendu

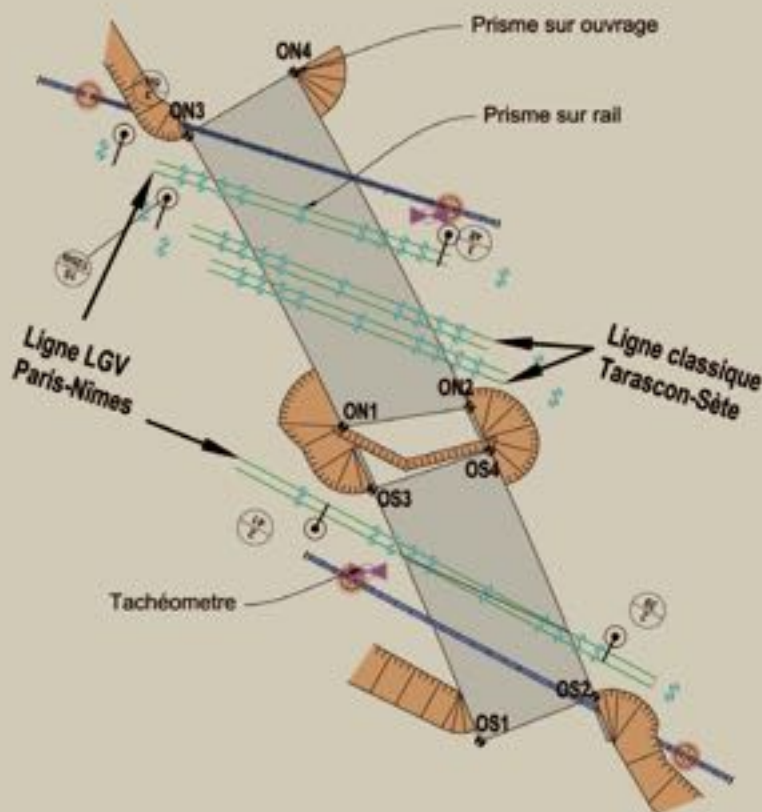


## MESURES DE SOULÈVEMENT



7

## AUSCULTATION DES VOIES



8

afin que le ripage puisse se faire pardessous, ou encore le confortement par micropieux de poteaux de signalisation proches de la fouille...

### Zoom sur les opérations de ripage

Chacune des opérations a permis lors de travaux en continu de réaliser :

- La dépose des voies SNCF ;
- Le déblai (6 000 à 8 000 m<sup>3</sup>) ;
- La préparation du fond de fouille ;

### 7- Mesures de soulèvement.

### 8- Auscultation des voies.

### 7- Heave measurements.

### 8- Track monitoring.

- Le ripage des ouvrages (3 000 et 4 000 t) par kamags ;
- Le remblaiement des ouvrages ;
- La repose des voies SNCF ;
- Les épreuves d'ouvrages.

Compte tenu du mode de levage et du poids des galeries latérales en porte-à-faux, il a fallu étudier le positionnement très précis des kamags sous l'ouvrage, afin d'éviter qu'il ne se déforme trop (figure 5).

C'est pourquoi un important travail a été réalisé par le bureau d'étude et le levageur, afin de trouver une solution de calage de l'ouvrage compatible avec les contraintes de chacun. En outre, un suivi topographique de la déformation des ouvrages lors du ripage a été mis en œuvre. Lors des essais de levage, des mesures ont ainsi été réalisées avant et après levage. Elles ont permis de mesurer des déplacements de l'ordre de 1 à 2 cm, conformes aux valeurs attendues.

### Les principaux enjeux de ces opérations

Le principal enjeu réside dans le respect du planning, qui impliquait une préparation logistique fine, afin de coordonner au mieux les 180 personnes mobilisées pour ces deux week-ends de travaux (figure 1).

Des enjeux techniques forts concernent également :

- La maîtrise des déformations de l'ouvrage ;
- La réalisation d'une plateforme apte à permettre le ripage (80 MPa demandés) alors que le terrassement se faisait dans une zone de rabatement de nappe ;
- La maîtrise du rabatement de nappe.

Lors de ces opérations, alors que les aspects techniques peuvent être étudiés et maîtrisés par les différents intervenants, l'aléa météorologique reste majeur dans une région et à une saison où les épisodes cévenols (précipitations localisées et intenses avec des cumuls pouvant dépasser 200 mm d'eau en quelques heures) sévissent en Languedoc-Roussillon.

Un suivi météorologique fin sur la zone de Manduel a permis de réaliser ces opérations, malgré des épisodes cévenols en cours dans la région.

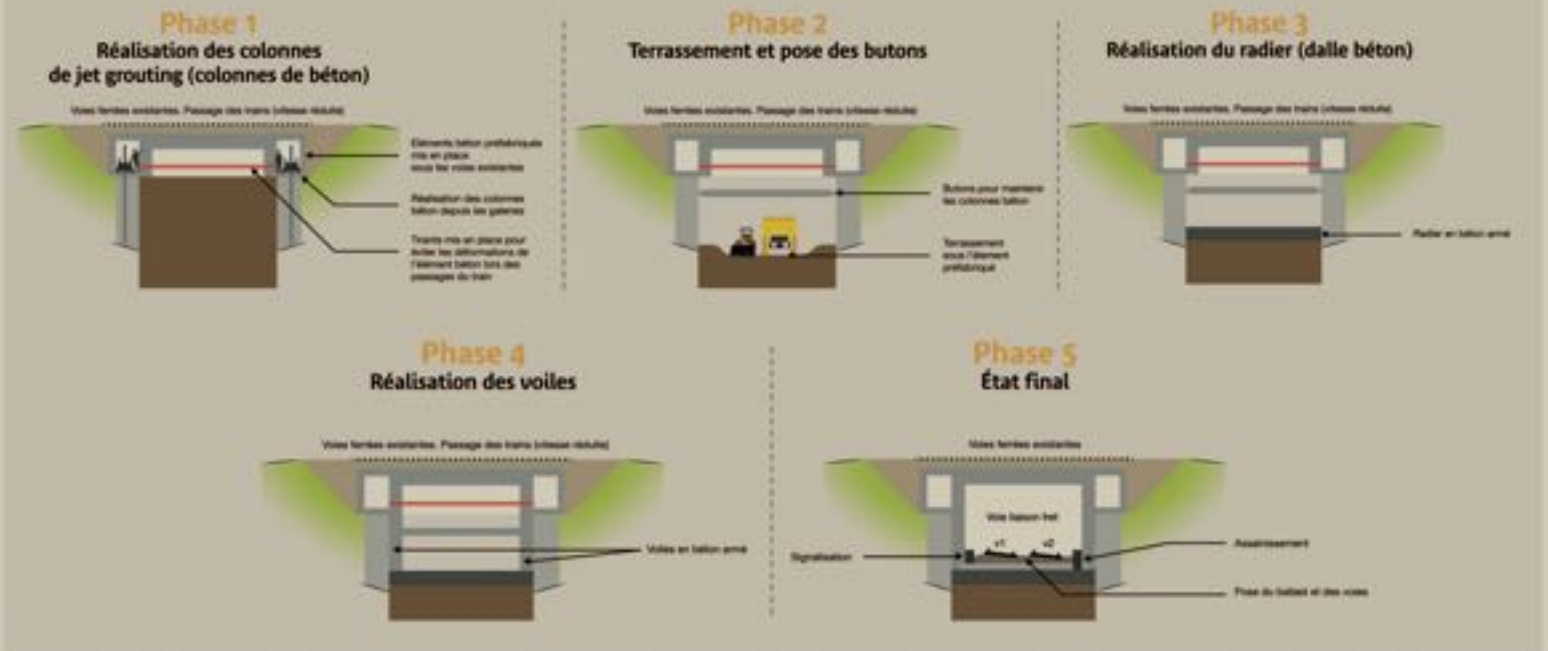
### LE RECOURS AU JET GROUTING UNE SOLUTION TECHNIQUE ADAPTÉE AU CONTEXTE

Le jet grouting est une technique d'injection de sol. Elle consiste tout d'abord à réaliser un forage classique. Sur la partie basse de la tige de forage est ajouté un élément de tige comportant une buse latérale (figure 6). Une fois le forage classique terminé, un coulis de ciment est envoyé à forte pression (plusieurs centaines de bars) par cette buse latérale. La tige est alors remontée lentement en tournant ce qui permet de décomposer le terrain par le jet de coulis à haute pression et de le mélanger à du coulis de ciment.



TRAVAUX « EN TAUPE »

**TRAVAUX DE LA TRANCHEE COUVERTE À RÉALISER SOUS LES VOIES**



On obtient ainsi en remontant un cylindre mêlant les matériaux en place et du coulis de ciment.

Dans le cas du chantier de Manduel, pour obtenir les colonnes de 1,5 m de diamètre et de 5 MPa de résistance nécessaires au projet, les paramètres de jet grouting sont les suivants :

- Pression d'injection : 380 bars ;
- Diamètre de buse : 5,5 mm ;
- Vitesse de remontée : 4 cm/28 s ;
- Dosage du coulis : 650 kg/m<sup>3</sup>.

**La maîtrise des risques de remontée des spoils et de soulèvements**

Étant donné le volume de coulis introduit dans le terrain, le surplus de coulis, ainsi qu'une partie du matériau charrié, remontent le long du train de tige et sont expulsés en surface pour former les spoils. La remontée des spoils dans la cheminée de forage pendant le jet grouting est un élément prépondérant de la technique du jet grouting. En effet, une mauvaise remontée de spoils témoigne de la création d'un bouchon dans la cheminée de forage, qui provoque une montée en pression du terrain sous ce bouchon. Cela peut provoquer des phénomènes de soulèvement du terrain.

Dans le cas du chantier de Manduel, tout soulèvement était interdit, puisque

le jet grouting est réalisé dans des galeries techniques directement situées sous les voies ferroviaires en circulation. Compte tenu de cette contrainte, la campagne d'essais classique nécessaire pour définir les paramètres de jet grouting en fonction de la nature du terrain a dû être prolongée afin de définir une méthodologie de réalisation n'occasionnant pas de soulèvements. En effet, lors des premiers essais, des soulèvements de l'ordre de 10 mm étaient mesurés quasi instantanément après le démarrage du jet grouting à 15 m de profondeur (figure 7). Il a donc fallu travailler d'une part sur la technique de forage et d'autre part sur la méthode de jet grouting pour supprimer ces phénomènes.

On cherche à obtenir un forage :

- D'un diamètre suffisant ;
- Dont les parois se tiennent afin de ne pas créer d'éboulements ou de bouchons ;
- Qui limite la libération de gros alluvions risquant de créer des bouchons.

Les essais ont ainsi été effectués avec différents types d'outils de forage (trilame ou tricône), en mettant ou non en œuvre un pré-découpage à la descente, afin d'aménager une cheminée de forage d'un plus gros diamètre, et en

**9- Travaux « en taupe ».**

**9- Top-down works.**

faisant varier le fluide de forage (eau, bentonite ou ciment).

En ce qui concerne la méthode de jet grouting, les essais ont plus particulièrement porté sur l'adjuventation du coulis de ciment afin d'obtenir une viscosité optimale des spoils, des spoils trop épais risquant de créer un phénomène de bouchon et de montée en pression tandis que des spoils trop liquides ne permettent pas une bonne remontée des alluvions pendant le jet grouting.

**L'AUSCULTATION DES VOIES SNCF**

Afin de maîtriser tout risque de tassement ou de soulèvement des voies ferroviaires pendant les travaux, qu'il s'agisse de soulèvements dus au jet grouting ou de tassements lors des travaux en sous-œuvre, une auscultation des voies a été mise en place (figure 8). Ce système d'auscultation en continu met en œuvre deux stations topographiques totales automatiques ainsi

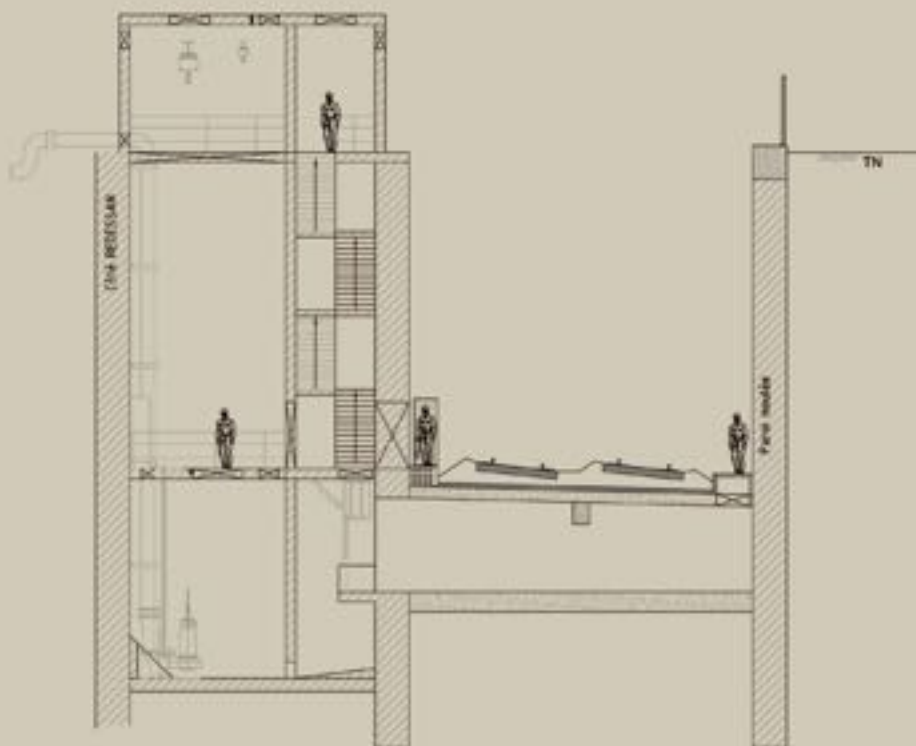
qu'une centaine de prismes, répartis sur les ouvrages et sur les rails des voies. Des mesures automatiques sont ainsi réalisées toutes les heures et permettent :

- D'identifier tout déplacement, afin de déclencher une alarme automatique, synonyme d'arrêt de travaux en cas de dépassement de seuils prédéfinis ;
- De contrôler à distance les paramètres géométriques de voies (nivelements, dévers de voies, gauches, etc.) afin de pouvoir vérifier à tout moment, y compris sous circulation, que la géométrie des voies est compatible avec une circulation ferroviaire en sécurité.

**DES TRAVAUX EN TAUPE, DANS UN ENVIRONNEMENT CONTRAINT**

Une fois le jet grouting achevé, les travaux « en taupe » sont réalisés. Ces travaux concernent l'excavation en sous œuvre en plusieurs phases, afin de conforter les colonnes de jet grouting par un butonnage. S'en suivra la réalisation d'un radier puis celle des piédroits de la galerie avant suppression des butons provisoires (figure 9). Ces travaux seront réalisés sous contraintes fortes :

## STATION DE POMPAGE



© C'Via CONSTRUCTION

10

- En termes de planning : chaque phase de travaux est en effet liée à une vitesse de circulation ferroviaire, définie en fonction du risque de tassement des voies pendant cette phase. Ainsi, les dates de changement de vitesse étant figées à l'avance, aucun décalage planning n'est possible pour aucune phase ;
- En termes d'accès : ils se feront par des puits à chaque extrémité des galeries ;
- En terme d'espace disponible, puisque la présence des butons

**10- Station de pompage.****10- Pumping station.**

tous les 3 m sera particulièrement pénalisante pour tous les travaux (taille des engins de terrassement, dégagement des engins de maintenance, mise en œuvre des coffrages, etc.).

### UN OUVRAGE CONNEXE : LA STATION DE POMPAGE ÉVITER L'ACCUMULATION D'EAU DANS UN POINT BAS

La réalisation d'une tranchée couverte pour le franchissement du faisceau ferroviaire crée un point bas dans le profil en long de la ligne. Il constitue un lieu d'accumulation des eaux de ruissellement. C'est pourquoi le projet intègre la réalisation d'une station de pompage pour extraire l'eau s'infiltrant dans la tranchée.

### RÉALISER UNE STATION ADAPTÉE À L'EXPLOITATION DE L'OUVRAGE

Cette station est constituée d'un réservoir sous les voies, dans la largeur de la tranchée. Ce réservoir a pour rôle de collecter les eaux de ruissellement au point bas de l'ouvrage. Une communication est alors prévue entre ce réservoir et une station de pompage à l'extérieur de la tranchée, par laquelle les eaux seront pompées et extraites de l'ouvrage. Cette station est constituée de parois moulées d'environ 28 m de profondeur formant un puits d'environ 7 m par 8 m. Ce puits sera excavé sur 16 m, puis différents niveaux de paliers y seront réalisés, ainsi que des cages d'escalier et autres aménagements industriels. Enfin, la station sera équipée de 6 pompes 150 m<sup>3</sup>/h et de tous les capteurs de niveaux d'eau et automates nécessaires à son fonctionnement automatique (figure 10).

### UN PLANNING DE RÉALI- SATION CONFORME AUX PRÉVISIONS

Le chantier a été lancé en début 2014. Après la mise en œuvre du rabattement de nappe, la préfabrication des ouvrages a pu démarrer début mai pour s'achever fin août 2014. Les ripages ont été réalisés comme prévu courant septembre et ont permis le démarrage du jet grouting. L'excavation et les travaux en sous-œuvre sous les voies ferroviaires ont débuté en janvier 2015 pour s'achever en mai de la même année. Parallèlement, les travaux de parois moulées ont débuté en mai 2014 et se poursuivent jusque fin janvier 2015, date à laquelle les travaux d'excavation et de réalisation des radiers démarrent. □

## ABSTRACT

**MANDUEL CUT-AND-COVER TUNNEL**

F. PETIT, BOUYGUES TP - A. BLANC, SPIE BATIGNOLLES TPCI - N. BERTHE, BOUYGUES TP

As part of the planned bypass around Nîmes and Montpellier, a freight link is being created to connect the new line to the existing lines; it must cross, underground, rail sidings consisting of 4 tracks (2 conventional tracks and 2 HST tracks). This requires the construction of a structure 1200 m long, consisting of 500 m of open-cut excavation with diaphragm walls to produce a descending access ramp, 200 m of cut-and-cover tunnel to pass under the railway tracks, and 500 m of open-cut excavation forming the exit ramp. Execution of the covered part involves skidding of structures under the railway tracks and top-down work while rail traffic continues, comprising jet grouting, excavation and civil engineering work. These top-down works are carried out under continuous monitoring of the railway track geometry to ensure safety. □

**EL FALSO TÚNEL DE MANDUEL**

F. PETIT, BOUYGUES TP - A. BLANC, SPIE BATIGNOLLES TPCI - N. BERTHE, BOUYGUES TP

En el marco del proyecto de Circunvalación Nîmes Montpellier, se ha creado un enlace de transporte de mercancías para conectar la nueva línea con las líneas existentes que debe cruzar, de forma subterránea, un haz ferroviario formado por 4 vías (2 vías convencionales y 2 vías de alta velocidad). Esto requiere la construcción de una estructura de 1.200 m de longitud, formada por 500 m de excavación abierta en paredes moldeadas realizando una rampa de descenso, 200 m de falso túnel para pasar bajo las vías de la SNCF (Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses) y 500 m de falso túnel que constituye la rampa de salida. La realización de la parte cubierta implica deslizamientos de estructuras bajo las vías férreas, trabajos de excavación y construcción Top-Down bajo circulación ferroviaria que incluyen jet grouting, excavación y trabajos de ingeniería civil. Estos trabajos de excavación y construcción Top-Down se realizan bajo control continuo de la geometría de las vías férreas para garantizar la seguridad. □





1  
© Oc'Via.CONSTRUCTION

# CONTOURNEMENT NÎMES MONTPELLIER : LA GESTION CONCERTÉE DE L'ALÉA KARSTIQUE

AUTEURS : JEAN-YVES BOUMEDI, RESPONSABLE GÉOTECHNIQUE AU SEIN DE LA DT INFRA D'OC'VIA CONSTRUCTION, BOUYGUES TP - CHRISTOPHE SUBIAS, RESPONSABLE COMMERCIAL PÔLE EAU, ANTEA GROUP - VIET-NAM TRINH, CHARGÉ D'ÉTUDES/AFFAIRES AU SEIN DU PÔLE GÉOTECHNIQUE, SYSTRA

**LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE DU CNM, DANS UN ENVIRONNEMENT MAJORITAIREMENT CALCAIRE, RÉSERVE QUELQUES SURPRISES. LA PRÉSENCE DE KARST, QUI CONSTITUE UN RISQUE NON NÉGLIGEABLE POUR LA CONSTRUCTION, N'EST PARFOIS DÉTECTÉE QU'EN PHASE DE DÉMARRAGE DU CHANTIER.**

## LE CONTEXTE DU PROJET

Le projet de CNM se développe en grande partie dans un environnement calcaire, notamment au niveau des garrigues de Lunel dans sa partie centrale (tronçon de 15 km de long environ) et de la Jasse de Maurin dans sa partie occidentale (3 km de long). Les formations recoupées par le projet sont essentiellement représentées par des calcaires ou des marno-calcaires d'âge Jurassique, Crétacé et Miocène (figure 2). Les études lancées en 2006 par Réseau Ferré de France

laissaient présager la présence de vides karstiques (cf. encadré) à faible profondeur. En témoigne, la grotte du Mas des Caves, cavité majeure non recoupée par le tracé, mais prouvant l'existence de vides importants (diamètre de 10 x 10 m), très proches de la surface (moins de 10 m sous le terrain naturel). Ces calcaires sont en général recouverts par des formations détritiques plus récentes, masquant les indices habituellement visibles en surface (soutirage, dépression) et rendant difficile toute interprétation.

**1- Vide pénétrable présent dans les calcaires du Miocène - secteur de Lunel Viel.**

**1- Penetrable void present in Miocene limestones - Lunel Viel sector.**

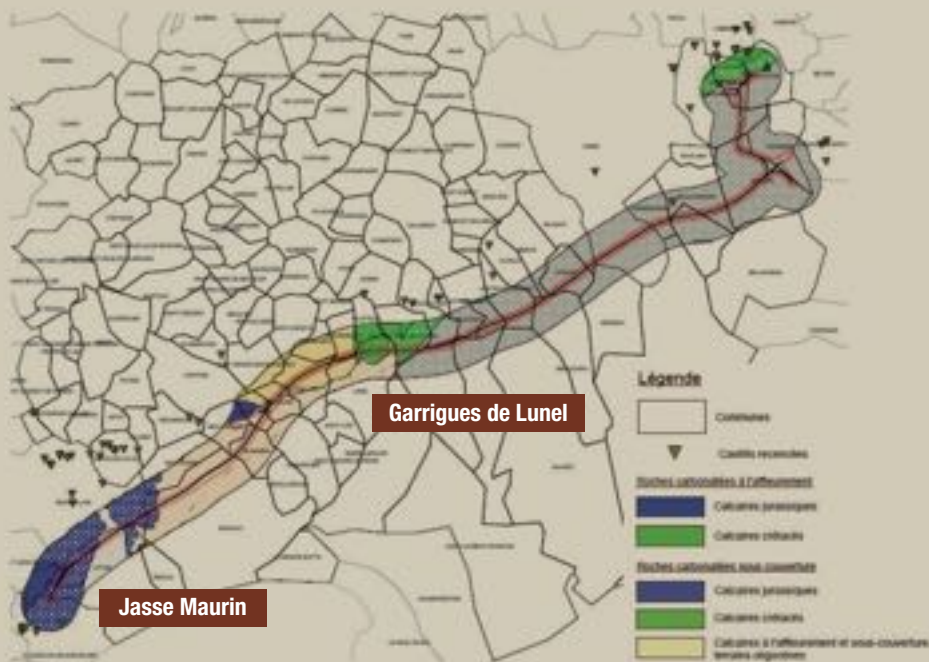
## MÉTHODOLOGIE

Oc'Via Construction s'est engagée dans la définition précise de l'aléa karstique, à partir d'une méthodologie déjà prouvée sur des chantiers similaires (cf. bibliographie). Cette méthodologie s'est déroulée selon les 3 volets suivants (figure 3) :

**1- Volet 1 :** diagnostic géologique et karstologique sur une bande de 500 m centrée sur le tracé. Ce travail, essentiellement de terrain, a permis de définir et cartographier les principaux types de formes karstiques en présence.



SITUATION DES FORMATIONS CARBONATÉES TRAVERSÉES RECOUPEES PAR LE CNM



© Oc'Via CONSTRUCTION 2

sage...). Sur cette base, la qualification de l'aléa a été redéfinie. Le but final était de proposer des orientations sur les dispositions constructives à prévoir vis-à-vis des risques géotechniques pressentis (mission G12 au sens de la norme NF P 94-500 de décembre 2006).

**3- Volet 3 :** adaptation des dispositions constructives en cours de l'avancée des travaux. Cette phase, plus opérationnelle, a permis de diagnostiquer, au cas par cas, chaque découverte d'indices karstiques et de valider les principes d'aménagement en concertation avec la maîtrise d'œuvre. Un suivi géologique et cartographique du chantier a été mis en place avec une organisation interne spécifique et dédiée à l'aléa karstique (réfèrent cavité Oc'Via Construction), en vue de la détection des écarts par rapport au niveau d'aléa prédéfini.

**QUALIFICATION DE L'ALÉA KARSTIQUE**

Les formations carbonatées recoupées par le projet ont connu une évolution karstique longue et très complexe. En effet, depuis l'époque du Crétacé, le littoral languedocien a subi de nombreuses phases de transgression marine qui ont recouvert la masse carbonatée d'une forte épaisseur de sédiments plio-quadernaires. De ce fait, la quasi-totalité des karsts de basse altitude ont évolué sous des couvertures de sédiments meubles. Ces couvertures ont joué le rôle de compresse humide et elles ont largement contribué à l'altération de la partie superficielle du massif carbonaté. Par la suite, l'érosion quadernaire a partiellement exhumé et retouché ces morphologies karstiques. On retrouve donc actuellement dans le paysage littoral ces anciennes buttes calcaires, remises à jour par l'érosion récente et chapeautées par des alluvions plus anciennes.

La définition du zonage de l'aléa a reposé sur le recoupement de deux données :

→ L'état de karstification actuel des formations observées en surface (présence de vides, dynamique karstique actuelle, état de colmatage du karst...),

→ Les informations données par les mesures indirectes (présence d'indices karstiques révélés par sondages ou par géophysique, taille des anomalies et leur fréquence...). À partir de ce regroupement d'indices, une note d'aléa comprendra 5 rubriques (figure 4) :

MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDES DES KARSTS (source LCPC)



© Oc'Via CONSTRUCTION 3

**2- Situation des formations carbonatées traversées recoupées par le CNM.**

**3- Méthodologie d'études des karsts (source LCPC).**

**2- Situation of the carbonaceous formations passed through, cut into by the CNM.**

**3- Karst study methodology (source: LCPC).**

En couplant cette approche naturaliste à une analyse des données de forages, il a été proposé une zonéographie provisoire de l'aléa karstique au droit du tracé.

**2- Volet 2 :** prospection géophysique et reconnaissances par sondages mécaniques sur les secteurs à aléa moyen à fort. Deux méthodes ont été testées (méthodes électriques et électromagnétiques) à une maille de mesures adaptée à l'objet recherché (taille du vide, présence de remplis-



Le projet de CNM s'est donc retrouvé confronté à plusieurs problématiques : La présence d'une altération importante des calcaires en surface, se matérialisant sous la forme de poches karstiques décamétriques, remplies de blocs de calcaire emballés dans une matrice souvent argileuse ou graveleuse (figure 5). Cette altération appelée crypto-corrosion (cf. encadré) peut être accompagnée de vides centimétriques à métriques (de l'ordre du mètre), souvent situés au sommet des remplissages.

Des phénomènes de soutirage peuvent apparaître en surface lorsque le remplissage est vidangé, par la création d'un talus ou d'un drainage artificiel par exemple.

L'adaptation du projet a donc consisté à purger l'ensemble de ces matériaux hétérogènes et à ancrer les différents ouvrages dans des assises calcaires homogènes et compétentes.

La présence de conduits karstiques de tailles variables, qui s'ouvrent dans des niveaux lithologiques préférentiels (essentiellement les calcaires du Miocène) et en dehors de tous contrôles tectoniques. Ces galeries présentent des formes de creusement en régime épinoyé (zone de battement de la nappe). La nature même des calcaires (calcaires coquilliers peu cohérents) a été très favorable à un développement rapide du karst et la formation de vides importants.

Ces vides sont en général comblés partiellement ou totalement par des remplissages, souvent d'argiles rouges de décantation parfois remaniées.

Des vides de l'ordre du mètre situés à faible profondeur ont été mis à jour (figure 6) et correspondent au décapage partiel des remplissages argileux par des écoulements plus récents, issus du drainage des formations alluviales superficielles.

Aucune doline n'a été rencontrée sur le projet CNM.

L'adaptation du projet a donc consisté également, pour garantir la stabilité des aménagements sur du long terme, à poser des nappes de géogrille.

La présence de fractures ouvertes (diaclasses), affectant pour l'essentiel les calcaires du Crétacé. Elles sont issues de la dissolution des calcaires sous l'action des couvertures alluviales aujourd'hui décapées. Ces fractures souvent métriques, s'enracinent souvent profondément dans la masse calcaire (de quelques mètres) et ont soutiré l'ensemble de la couverture superficielle (figure 7).

## DÉFINITION DE LA QUALIFICATION DE L'ALÉA KARSTIQUE

ALÉA NUL	ALÉA FAIBLE	ALÉA MODÈRE	ALÉA FORT	ALÉA TRÈS FORT
Absence de risques karstiques Formations géologiques non sujettes à la karstification Aucunes formes karstiques héritées	Karst sans fuite couverture Karstification faible Aucun indice karstique identifié et/ou Intensité des phénomènes minime Probabilité pour affecter le projet faible	Indices karstiques négligeables Karst sous faible couverture Paléo-formes karstiques peu évoluées et calmatées Impact sur le projet nul Bonne mise en œuvre adaptée à l'objet karstique	Présence d'indices karstiques Karst affleurant Paléo-formes karstiques évoluées Impact sur le projet possible Bonne mise en œuvre adaptée à l'objet karstique	Présence d'indices karstiques [vides] Zones à forte incidence de karstification Paléo-formes évoluées Bonne mise en œuvre spécifiques Attention particulière lors des travaux

4

© CC-VIA.CONSTRUCTION

En général, ces formes ne sont associées à aucun phénomène de soutirage actif ou ancien.

La problématique a donc consisté, au cas par cas, à purger les matériaux de remplissage hétérogènes dans un déblai, par exemple, ou à combler le vide décollé en voûte des matériaux de comblement par un coulis de remplissage ou béton présent sous un remblai.

### DIFFICULTÉS RENCONTRÉES

La définition de l'aléa karstique s'est basée préférentiellement sur des observations de l'état de surface des calcaires recoupés par le projet.

Compte tenu de la forte anthropisation de la zone littorale traversée (vignoble,

#### 4- Définition de la qualification de l'aléa karstique.

#### 5- Poche karstique remplie de sédiments argilo-graveleux.

#### 4- Definition of the classification of karstic risk.

#### 5- Karstic pocket filled with clay-gravel sediments.

nombreux remblais, carrières...) et du fort recouvrement de la masse carbonatée par des alluvions plus récentes, les observations géologiques ont été délicates et relativement partielles.

De plus, certains phénomènes ne sont pas visibles par une simple prospection car leur fonctionnement est épisodique et les pratiques agricoles ont effacé les traces anciennes.

De ce fait, l'approche géophysique a contribué à délimiter des secteurs homogènes, caractérisés par une forte résistivité des formations testées, pouvant être mise en relation avec leur compacité et leur faible karstification. Aucune des méthodes testées n'a cependant permis de détecter avec



5

© CC-VIA.CONSTRUCTION





6

© Oc'Via.CONSTRUCTION

certitude un vide centimétrique ou métrique à plus de 5 mètres de profondeur. Le radar géologique s'est trouvé largement limité par la présence de matériaux argileux en surface (argiles, marnes).

L'adaptation du projet pendant la phase opérationnelle a été primordiale et traitée au cas par cas dans les secteurs problématiques. Des reconnaissances complémentaires (fouilles à la pelle,

**6 & 7- Conduits karstiques affectant les calcaires du Miocène.**

**6 & 7- Karstic channels affecting the Miocene limestones.**

sondages carottés, radar géologique) ont été justifiées et ciblées au cours de l'avancée des travaux. Elles ont permis de compléter les observations visuelles effectuées tout au long des travaux et de réadapter chaque disposition constructive à la problématique concernée.

### EXEMPLE DU SDM : RLO15-2 À LATTES

#### CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

L'ouvrage se trouve entre les collines de Maurin et le Rieu-Coulon. La moitié sud de l'ouvrage est posée sur les calcaires du Jurassique supérieur des collines de Maurin, tandis que la moitié nord repose sur les dépôts quaternaires du Rieu-Coulon ayant une épaisseur très variable, de 0 m à plus de 30 m.

Les collines de Maurin constituent l'extrémité Nord-Est du massif de la Gardiole, qui s'ennoie sous les formations quaternaires et tertiaires de la plaine littorale. Ces collines sont constituées de calcaires du Jurassique supérieur (Kimméridgien-Portlandien) recouverts sur des épaisseurs variables de formations plio-quaternaires. Il s'agit de calcaires en gros bancs décimétriques à métriques, à patine blanche ou beige, présentant un léger pendage de 20 à 30°C vers l'est. Les sondages situés à l'est du projet ont recoupé des calcaires marneux attribués au Kimméridgien supérieur - Oxfordien.

Le massif calcaire de Maurin est entouré par des fossés d'effondrement d'orientation NE-SW, comblés par des dépôts quaternaires et tertiaires.

Ce massif est probablement bordé par de grandes failles, comme l'indiquent les épaisseurs de recouvrement plio-quaternaire rencontrés dans les sondages sur le secteur du bourg de Maurin (80 à 150 m) (figure 9).

Les formations de recouvrement sont les suivantes :

→ Dépôts quaternaires :

- Alluvions récentes des principaux cours d'eau à faciès sablonneux et graveleux,
- Colluvions constituées essentiellement de cailloutis roulés emballés dans une matrice argilo-limo-neuse rouge.

→ Formations du Tertiaire : les sables jaunes de l'Astien recouvrant les calcaires à l'est du projet sur une épaisseur de 10 à 15 m. Les niveaux sableux peuvent alterner avec des grès consolidés ou des poudingues.

Le risque de remontée de nappe est très élevé avec une nappe sub-affleurante aux bords du Rieu-Coulon.

Une partie de l'ouvrage se situe dans la zone inondable entre PK1+430 et PK1+480.

#### ALÉA CAVITÉS

Les calcaires jurassiques de Maurin présentent un fort potentiel de karstification. L'analyse de la base de données Antea indique :

- 41 % des ouvrages recoupent des indices karstiques dont 29 % sont des vides. Le reste représente des vides à remplissages sableux, argileux ou calcitiques ;
- Les vides sont pour l'essentiel situés entre 7 et 15 m de profondeur (soit entre 2 et -5 m NGF) ;
- Les tailles sont comprises entre 0,3 et 1 m.

#### RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES

Plusieurs campagnes de reconnaissances géotechniques ont été réalisées dans la zone de l'ouvrage :

- **APS** : 1 campagne (1 CA + 2 Pz + 2 FP + 1 FD + 1 PM) ;



7

© Oc'Via.CONSTRUCTION





© Oc-Via CONSTRUCTION 8

→ **APD** : 3 campagnes (3 FP +6 FD) ;  
→ **EXE** : 3 campagnes (1 CA+ 6 FP +224 FD).

**CA** : sondage carotté - **FP** : sondage pressiométrique - **FD** : sondage destructif - **PM** : sondage à pelle mécanique - **Pz** : Piézomètre.

L'extrait de la maquette géotechnique du projet (figure 1) permet de visualiser le contexte géotechnique dans la zone de l'ouvrage. Le massif calcaire de la Gardiole dont le toit du calcaire plonge rapidement vers le nord et vers l'ouest. Il s'agit vraisemblablement d'un contact anormal correspondant à une faille ou à une surface en liaison avec le fossé d'effondrement associé à une zone de remplissage alluvionnaire. La couverture quaternaire et tertiaire voit sa puissance augmenter de manière significative (40 m sur 40 m). Les indices de karstification en rouge, superficiels ou profonds, sont observés sur le log des sondages.

### MODÈLES GÉOTECHNIQUES

De la phase APD à la phase EXE les modèles géotechniques ont évolué pour intégrer les résultats des campagnes géotechniques complémentaires, notamment les nombreux sondages destructifs réalisés lors de l'injection des cavités. Les modèles géotechniques finaux sont définis de la manière suivante :

## LE KARST

La spécificité des roches carbonatées telles que les calcaires provient du processus de karstification qui est à l'origine de la dissolution des massifs carbonatés (calcaires et dolomies), notamment au niveau des zones de plus grande conductivité hydraulique constituées par les discontinuités tectoniques (fractures) et stratigraphiques qu'ils comprennent.

L'eau chargée en gaz carbonique dissout ainsi le carbonate de calcium de la roche pour former des ions dissous de bicarbonate de calcium qu'elle transporte et évacue hors des massifs. Elle élargit progressivement les vides initiaux dans lesquels elle circule, en façonne les parois et les agrandit jusqu'à créer de véritables chenaux qui facilitent l'infiltration et accentuent le processus amorcé. Il en résulte une morphologie de surface caractéristique (dépression, soutirage...) associée à un paysage souterrain constitué par des vides de dimensions et de géométrie variables, pénétrables ou non par l'homme.

Les instabilités liées à la présence de cavités souterraines génèrent des désordres qui peuvent se propager jusqu'à la surface. Les conséquences peuvent être très graves : dégâts sur les constructions et des ouvrages de génie civil, insécurité en cas de phénomène brutal lors de la phase chantier, affaissement de la plate-forme à moyen terme. La définition de l'aléa karstique s'inscrit donc dans une politique de prévention des risques naturels et technologiques.

La cryptoaltération consiste en l'altération de la masse rocheuse au contact d'une autre formation perméable non karstifiable de couverture du massif calcaire. Ce processus se produit généralement lorsqu'une formation alluviale repose sur le substratum calcaire. La disparition de matière par dissolution du carbonate à son toit entraîne un enfouissement progressif de la couverture non karstifiable avec formation de morphologies particulières (appelé des cryptoformes) (figure 8). Il n'y a généralement pas de vide résultant de ce processus. Ce processus crée des phénomènes géochimiques particuliers avec la genèse de silicates (halloysite), de phosphates, d'oxydes et d'hydroxydes d'aluminium et de fer.

**8- Vue d'une cryptoforme - secteur de la Jasse Maurin.**

**8- View of a cryptoform - Jasse-Maurin sector.**

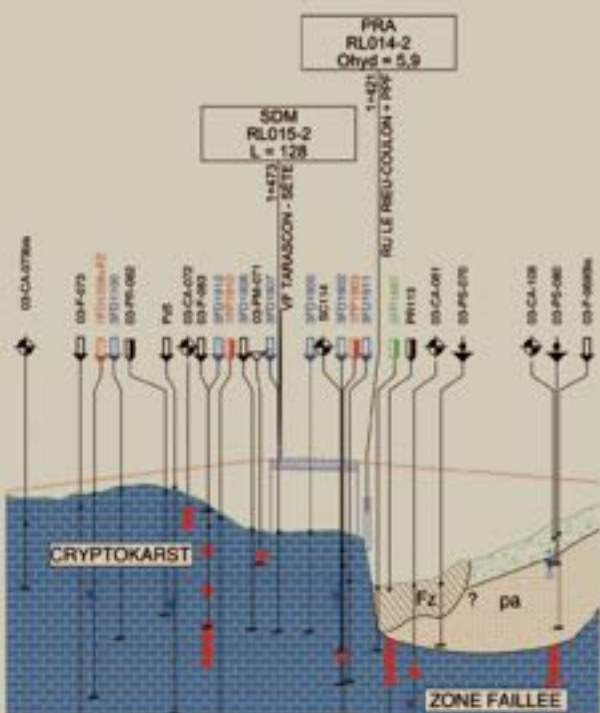
- Les caractéristiques mécaniques des formations sont définies à partir des sondages pressiométriques :
- Les formations du Quaternaire et du Tertiaire sont des sables et graviers à matrice argileuse de type A à B avec des pressions limites moyennes par zone variant de 0,9 à 2 MPa. Les modules pressiométriques moyens sont compris entre 7 et 18 MPa.
  - Pour la zone karstique, les pressions limites moyennes des remplissages sont comprises entre 0,8 et 1,1 MPa. Cette zone sera injectée en conservant les caractéristiques mécaniques avant l'injection dans les calculs car l'objectif du traitement par injection est de rétablir les caractéristiques prudentes du calcaire.
  - Pour le substratum calcaire, les valeurs moyennes de pression



9- Contexte géologique des collines de Maurin.  
10- Extrait de la maquette géotechnique.

9- Geological context of the Maurin hills.  
10- Extract from the geotechnical mock-up.

EXTRAIT DE LA MAQUETTE GÉOTECHNIQUE



limite sont comprises entre 3,5 et 7,4 MPa avec des modules pressiométriques qui s'échelonnent entre 31 et 388 MPa.

→ L'analyse géologique se base principalement sur des descriptions des sondages destructifs et les sondages carottés :

- Au sud (plots 1 à 3 /~ 60 m), l'assise de l'ouvrage correspond à un massif calcaire karstique avec une couverture meuble très réduite (0 à 2,5 m environ). Des indices de karstification proches de la surface ont été détectés.
- Au centre (plot 4 /~ 21 m), une couverture argileuse d'épaisseur variable de 5 à 6 m et de 5 à 21 m du sud vers le nord se trouve respectivement sous les piédroits du plot 4 est et du plot 4 ouest. La couverture se pose sur un substratum marno-calcaire à calcaire extrêmement karstifié.
- Au nord (plots 5 et 6 /~ 40 m), une couverture d'argiles sableuses à cailloutis, dont l'épaisseur varie du

sud vers le nord entre 7 et 25 m pour les piédroits Est et de 23 à plus de 35 m pour les piédroits Ouest. En-dessous, on retrouve les formations du Secondaire.

BIBLIOGRAPHIE

Pour toutes informations sur les retours d'expériences sur les projets ferroviaires, on se référera aux articles et documents suivants :

- Méthodologie de prise en compte du risque « cavités » dans les projets de lignes à grande vitesse - 2002 - SNCF Direction de l'ingénierie ;
- LGV Rhin Rhône : une gestion intégrée du risque karstique de la conception à la réalisation - 2011 - Géorail ;
- Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines - Collection Environnement Les risques naturels - 2002 - LCPC ;
- Rapport Antea AA69097A - Oc'Via volet 1 et 2 version C de février 2014. □

ABSTRACT

**NIMES MONTPELLIER BYPASS: CONCERTED MANAGEMENT OF KARSTIC RISK**

JEAN-YVES BOUMEDI, BOUYGUES TP - CHRISTOPHE SUBIAS, ANTEA GROUP - VIET-NAM TRINH, SYSTRA

The planned bypass around Nîmes and Montpellier cuts through carbonaceous formations in the Garrigues de Lunel and Jasse-Maurin sectors. These formations suggested a karst-related risk. Antea, mandated by Oc'Via Construction, performed zoning and produced a karstic risk evaluation report based on the analysis of geological data, geophysical prospection and mechanical sounding. The RL015-2 flyover in the Jasse-Maurin sector is located in a karstic risk zone. The geotechnical model was adjusted based on destructive drilling data recorded as drilling parameters. The karstic limestone mass was injected under the shallow and deep foundations of the structure. The post-injection pressure measurement properties allowed optimisation of pile lengths in the Jurassic limestones of Jasse-Maurin at Lattes. □

**CIRCUNVALACIÓN NIMES MONTPELLIER: LA GESTIÓN CONCERTADA DEL RIESGO KÁRSTICO**

JEAN-YVES BOUMEDI, BOUYGUES TP - CHRISTOPHE SUBIAS, ANTEA GROUP - VIET-NAM TRINH, SYSTRA

El proyecto de Circunvalación Nîmes Montpellier corta formaciones carbonatadas en los sectores de Garrigues de Lunel y de Jasse Maurin. Estas formaciones permitían presagiar un riesgo relacionado con los karsts. Oc'Via Construction encargó a Antea que realizara una zonificación y una nota de evaluación del riesgo kárstico basada en el análisis de los datos geológicos, de la prospección geofísica y de los sondeos mecánicos. El salto de camero RL015-2 en el sector de Jasse-Maurin se encuentra en una zona de riesgo kárstico. El modelo geotécnico se ha realizado a partir de perforaciones destructivas registradas en parámetros de perforaciones. Se inyectó el macizo calcáreo kárstico bajo las cimentaciones superficiales y profundas de la estructura. Las características presiométricas post inyección permitieron optimizar las longitudes de las estacas en las calizas jurásicas de Jasse Maurin en Lattes. □



