

27 novembre à Belfort

Le viaduc de la Savoureuse (LGV Rhin-Rhône)

La délégation Grand-Est, en partenariat avec Construiracier, a organisé le 27 novembre une journée consacrée au viaduc de la Savoureuse.

La ligne à grande vitesse Rhin-Rhône est composée de plus de 150 ouvrages d'art courants (ponts) et treize ouvrages d'art majeurs dont les plus prestigieux sont le viaduc de la Savoureuse et le tunnel de Chavanne.

Long de 792 m et surplombant la vallée de la Savoureuse entre Belfort et Montbéliard, le viaduc de la Savoureuse franchit la rivière éponyme, l'autoroute A36, le canal de la Haute-Saône et la RN 437 en alliant de très lourdes contraintes techniques à une esthétique remarquable.

Retenue à l'issue d'un concours de conception visant à susciter des solutions soignant particulièrement l'insertion du viaduc dans le site, la structure comprend :

- Un tablier métallique à poutres latérales assurant à la fois rigidité longitudinale et protection acoustique.
- Des piles régulièrement espacées tous les 66 m composées de quatre béquilles métalliques créant un profil en 'V' et reposant sur un socle en béton.

Esthétiquement, ce viaduc offre au regard une ligne très élancée qui lui permet de s'insérer de manière optimale dans l'environnement.

Rappel du programme

9h30 Accueil des participants

9h50 Introduction

AFGC Grand Est, ConstruirAcier, RFF

10h00 La LGV Rhin-Rhône, le cahier des charges, les contraintes techniques et environnementales

Thierry Dalloz, Hugues Nollet, Pierre Thépenier - RFF

10h30 La conception architecturale et technique

Sébastien Ricard - Wilkinson Eyre

Christophe Cézard & Gilles Frantz - Egis JMI

11h00 Rôles de la maîtrise d'oeuvre travaux

Rémy Martz - Setec

11h15 Pause café

11h45 Le projet de construction dans ses grandes lignes

Raphael Schaeffer - Eiffel CM

Vincent Crespin - Eiffage

12h15 La construction métallique (tétrapodes et superstructures, études d'exécution, préfabrication, fabrication et montage)

Guillaume Garnier & Patrice Schmitt - SNCF

Raphael Schaeffer - Eiffel CM

13h00 Déjeuner au Novotel Atria

14h30 Visite commentée du chantier

Synthèse des conférences

La LGV Rhin-Rhône, présentation du projet

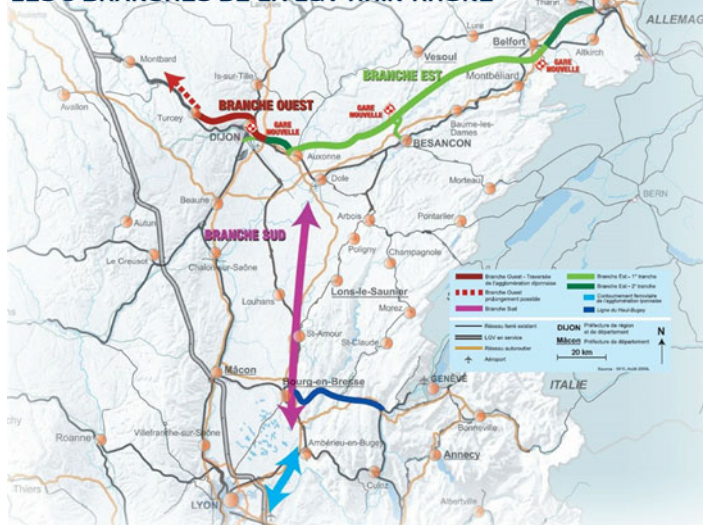
Thierry Dalloz

Les enjeux de la LGV Rhin-Rhône :

- Développer des liaisons ferroviaires Est-Ouest depuis l'Alsace, la Suisse jusqu'à Lille et Bruxelles via l'agglomération parisienne
- Développer des liaisons ferroviaires Nord-Sud pouvant aller de l'Allemagne jusqu'à l'Espagne ou l'Italie
- Améliorer les liaisons ferroviaires interrégionales entre les métropoles des régions Alsace, Bourgogne, Franche-Comté et Rhône-Alpes
- Réduire les temps de parcours actuels



LES 3 BRANCHES DE LA LGV RHIN-RHÔNE



- septembre 1992 : début des études préliminaires
- mai 1995 : choix du fuseau par le Ministre des Transports et lancement de l'Avant-Projet Sommaire
- mai - juillet 2000 : réalisation de l'enquête publique
- 25 janvier 2002 : signature de la déclaration d'utilité publique
- juin 2002 - août 2004 : phase d'Avant Projet Détaillé
- sept. 2004 - juin 2006 : phase Projet
- juillet 2006 : début des travaux
- Fin 2011 : mise en service de la ligne

Quelques chiffres clés :

Un tracé de 140 km, dont 40% en forêt et divisé en trois tronçons :

- tronçon A (56 km) : maîtrise d'œuvre SETEC
- tronçon B (57 km) : maîtrise d'œuvre EGIS Rail
- tronçon C (30 km) : maîtrise d'œuvre SETEC

85 communes concernées

160 ponts

12 viaducs

1 tunnel

300 km de clôtures

2 gares nouvelles

30 millions de m³ de déblais

22 millions de m³ de remblais



Caractéristiques de la ligne

Tracé à 350 km/h

Vitesse commerciale 320 km/h

Rampes maxi 35 0/00 → trafic voyageurs uniquement

Interopérabilité : prise en compte des STI* européennes

*(spécifications techniques d'interopérabilité)

Les manifestations régionales

Le contexte géologique

Tronçon A

- relief peu marqué (1 seul viaduc pour le franchissement de la Saône)
- terrains majoritairement argileux ou alluvionnaires (vallée de la Saône)

Tronçon B

- relief peu marqué à part trois vallons franchis en viaduc
- terrains variés (argiles, marnes, calcaires → problématique karst)

Tronçon C

- relief accidenté (1 tunnel, 5 viaducs)
- terrain majoritairement calcaire → problématique karst
- aléa sismique (zone 1b - règles PS92 ; zone II - réglementation à venir)

Le viaduc de La Savoureuse

Contraintes du site

Un contexte péri-urbain nécessitant un traitement architectural particulier

Présence d'une zone commerciale dans la partie Est nécessitant le déplacement préalable de deux bâtiments commerciaux

De nombreuses infrastructures existantes :

- rivière la Savoureuse
- autoroute A36
- canal de la Haute-Saône
- RD 437

Le milieu naturel

Les cours d'eau (rivière la Savoureuse et ruisseau des Contours) :

- éviter d'impacter l'écoulement de la crue centennale (330 m³/s)
- éviter d'altérer la qualité des eaux en phase chantier
- mais pas de disposition particulière pour le rejet des eaux issues du tablier (traction électrique)

Les zones naturelles sensibles :

- protéger la végétation sur les berges et dans la bande comprise entre autoroute et canal
- présence d'une zone classée ZNIEFF à 200m au sud du viaduc

Les villages environnants :

- écrans acoustiques à prévoir sur le viaduc (engagements de l'Etat)

Géomorphologie de la vallée de la Savoureuse :

- une ligne de séparation des zones pré-jurassiennes à l'ouest et du fossé rhénan à l'est, orientée NNE-SSO
- une plaine alluviale plate et large de près d'un kilomètre
- un substratum marno-calcaire

Hydrogéologie :

- nappe phréatique proche de la surface sur toute la largeur du lit majeur (batardeaux provisoires pour la réalisation des fondations)
- terrain argileux à l'extrémité Est également saturé d'eau (drains verticaux et surcharge de terrassement pour accélérer le tassement)

Cinq campagnes de reconnaissances géotechniques :

- une première campagne sommaire au stade APS/APD du tronçon C (résultats annexés au dossier du concours de conception)
- une deuxième pendant la phase du concours, plus détaillée et tenant compte du tracé définitif
- une troisième en 2005 sur la base d'un programme défini par JMI (sondage pressiométrique sous chaque appui)
- une quatrième fin 2005 orientée sur la recherche d'éventuelles cavités dans le substratum sous les appuis
- une cinquième et dernière en 2006 pour affiner les calculs de stabilité et de tassement du remblai technique à l'extrémité Est du viaduc

Les manifestations régionales

Le climat et l'aléa sismique

Le climat :

- continental donc assez rude mais une altitude modeste de 336 mètres
- humide
- ouvrage orienté OSO-ENE dans le sens des vents dominants (pas d'impact des vents traversiers)

La sismicité :

- zone Ib (règles PS92)
- ouvrage classé en classe C, accélération de 2m/s^2 à l'ELU

Le concours de conception

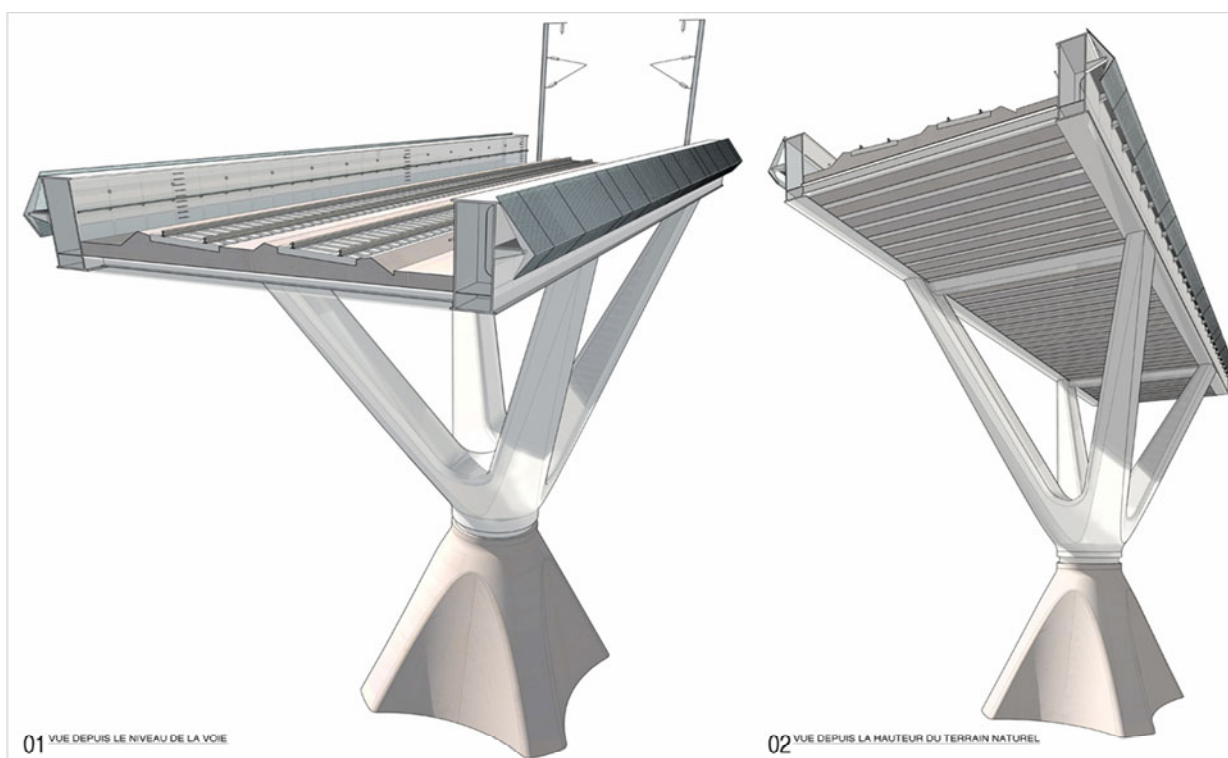
Compte tenu de la situation particulière de l'ouvrage (environnement péri-urbain, franchissement d'un axe très fréquenté), décision de lancer un concours de conception :

- candidats composés d'un bureau d'études et d'un cabinet d'architecte
- sélection établie sur la base d'un dossier de définition avec estimation de coût
- jury composé de RFF, APRR, Architecte, Ingénieur, Territoire de Belfort
- lauréat engagé en phase travaux dans le contrôle des études EXE

La conception architecturale

Sébastien Ricard - Wilkinson Eyre





La conception technique

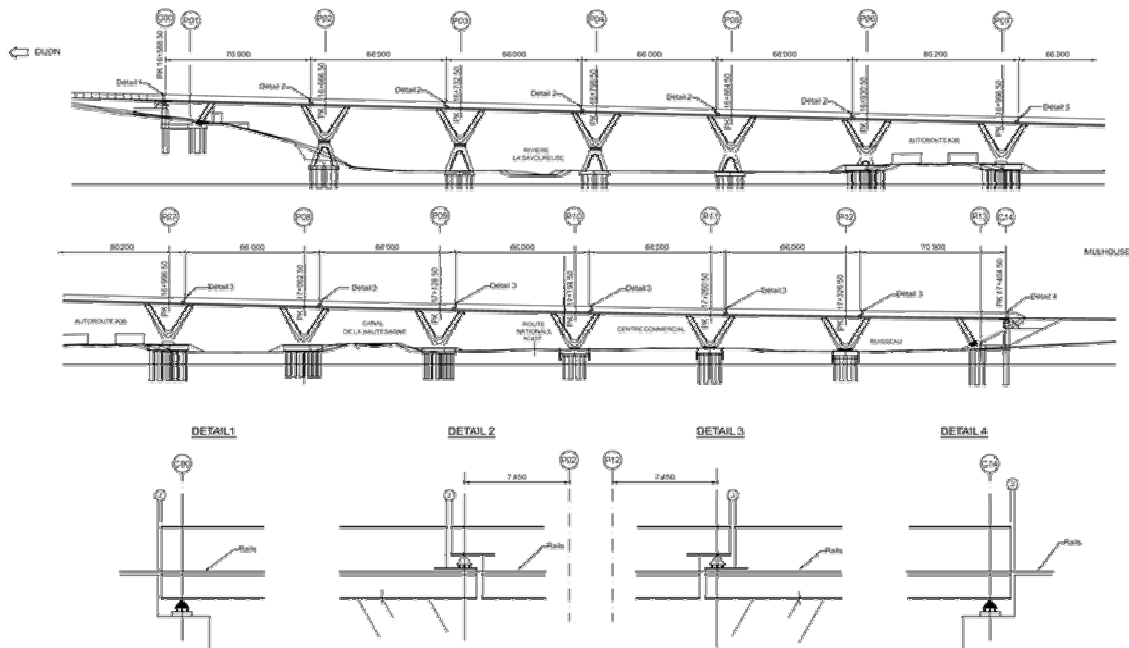
Christophe Cézard & Gilles Frantz - Egis JMI

Conséquences des contraintes sur la conception de l'ouvrage

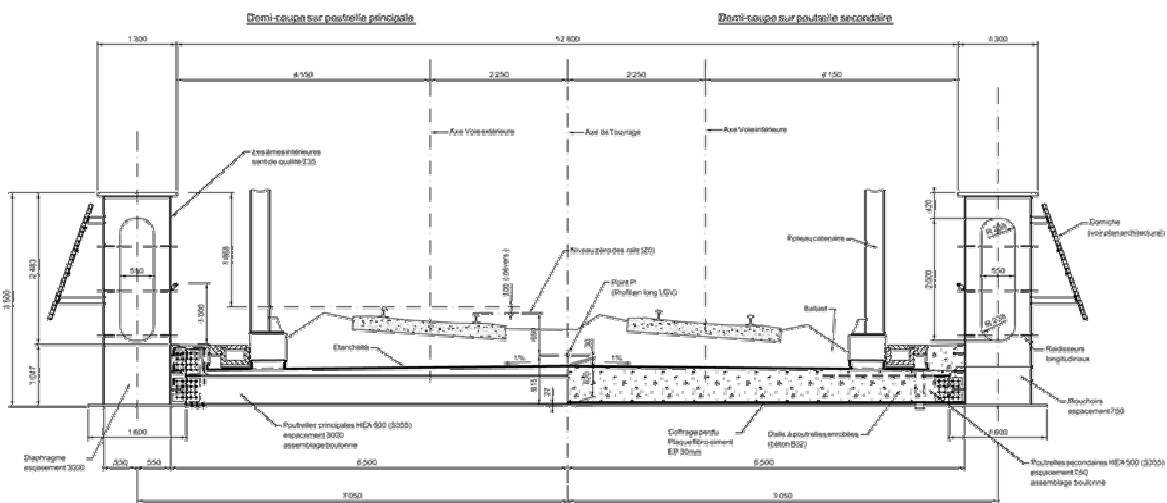
- Contraintes d'implantation des appuis et choix de la travure
 - Les voies et rivières franchies / la position des appuis d'extrémité
- Un site fragmenté, des circulations de chantier adaptées
- Contraintes géotechniques et hydrauliques
 - Fondations profondes
 - Batardeaux provisoires
 - Consolidation du remblai Est
 - Recherche et traitement des Karsts

Conception proposée

Schéma fonctionnel : une succession de portiques

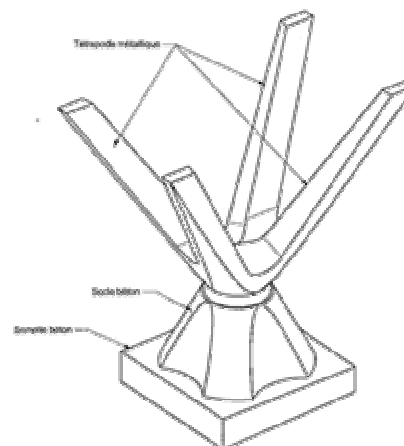


Structure transversale du tablier : un RAPL à poutres caissons



Pour les 11 appuis courants :

- Tous les efforts doivent passer par la « taille de guêpe » de 4,4 m de diamètre.
- Le « tétrapode » en acier est cloué par précontrainte sur le socle en béton.
- Une bêche d'ancrage assure la transmission de l'effort tranchant.



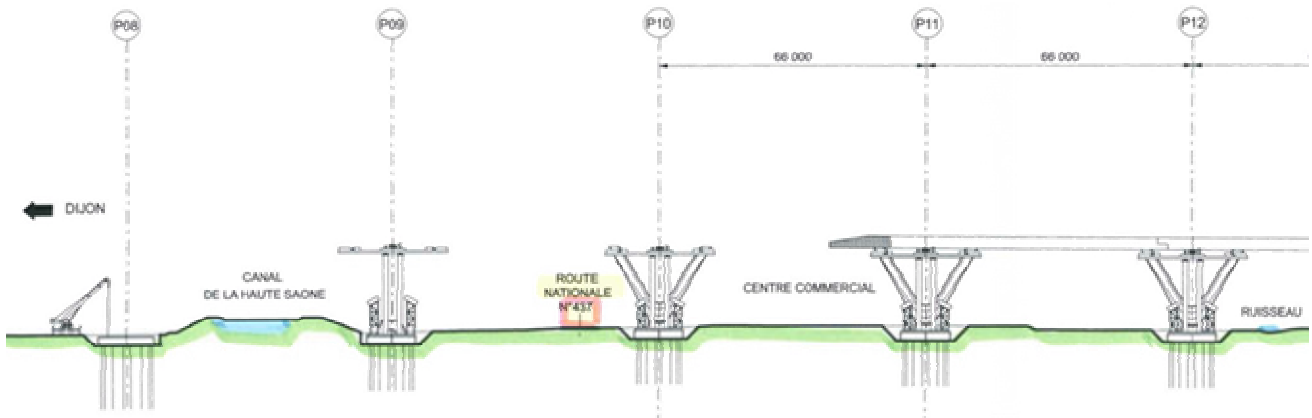


*h en mètres = distance entre le rail et l'axe d'appui du pont

- Base réglementaire
 - Référentiel technique de la LGV Rhin-Rhône Livre 1 Tome IV « Ouvrages d'art » (2002)
 - Fascicule 2.01 de la SNCF
 - Spécification technique d'interopérabilité du système ferroviaire transeuropéen à grande vitesse (2002)
 - Cahier-programme de la LGV Rhin-Rhône « étude dynamique des ponts-rails » (2005)
 - EN 1991-2 Eurocode 1 partie 2 « actions sur les ponts dues au trafic » (2004)
 - Vitesse de référence de la ligne : 350 km/h
- Limitation de la longueur dilatable des tronçons d'ouvrage
 - Pour faire passer une voie continue sur un ouvrage, la longueur de dilatation LT ne doit pas dépasser :
 - 60 m pour les ouvrages entièrement métalliques,
 - 90 m pour les ouvrages mixtes et les ouvrages en béton.
 - Le schéma fonctionnel proposé permet de se passer d'appareils de dilatation :
 - L totale = 80,2 m pour le portique central, et 66 m pour les portiques courants.
 - On a pu ainsi abaisser le profil en long de la ligne, et diminuer le volume du remblai Est.
- Stabilité du ballast
 - Accélération verticale limitée à $3,5 \text{ m/s}^2$ à l'axe de la voie sous le passage des dix trains du convoi universel A
 - Accélération verticale limitée à 7 m/s^2 sous sollicitations sismiques de service
- Limitation de la déformation des rails
 - Gauche total limité à 7,5 mm sur 3 m
 - Gauche sous chargement UIC71 $\times \Phi < 1,5$ mm sur 3 m pour $V > 220 \text{ km/h}$
 - Gauche sous chargement réel $\times \Phi_{\text{réel}} < 1,5$ mm sur 3 m pour $V > 220 \text{ km/h}$
- Limitation de la déformation des rails
 - Rotation d'extrémité du tablier pour les ponts à deux voies où $V > 220 \text{ km/h}$:
Sous chargement UIC71 $\times \Phi$
 - $\Theta < 3,5 \cdot 10^{-3}$ radians entre remblai et tablier
 - $\Theta_1 + \Theta_2 < 5 \cdot 10^{-3}$ radians entre deux tabliers consécutifs
 - Sous chargement réel $\times \Phi_{\text{réel}}$
 - $\Theta < 2 \cdot 10^{-3} / h^*$ radians entre remblai et tablier
 - $\Theta_1 + \Theta_2 < 4 \cdot 10^{-3} / h^*$ radians entre deux tabliers consécutifs
- Flèches horizontales du tablier sous séisme transversal de service :
 - Déplacement relatif transversal entre le remblai et le tablier $\text{drt} < 20 \text{ mm}$
 - Rayon de courbure horizontal $> 9500 \text{ m}$
 - Déviation angulaire $< 0,003$ radian
- Contraintes dans les rails : L'objectif est de limiter les contraintes dans les rails en service
 - En l'absence d'appareils de dilatation, le déplacement du tablier sous l'action simultanée du démarrage et du freinage des trains ne doit pas dépasser 5 mm,
 - Dans le fascicule 2.01, la contribution des rails à la rigidité de l'ensemble voie-ouvrage est prise en compte forfaitairement en minorant les efforts (chapitre 1, tableau I.6). Mais il est loisible d'étudier directement l'interaction voie-ouvrage, en modélisant le comportement non linéaire du ballast. Il faut alors calculer de surcroît les contraintes extrêmes des rails, en combinant les effets des charges verticales concomitantes des efforts de freinage/démarrage, des variations uniformes de la température ($\pm 35^\circ\text{C}$) et du gradient thermique.
 - Sous séisme longitudinal de service le déplacement relatif longitudinal entre le remblai et le tablier est limité : $\text{drl} < 20 \text{ mm}$.
- Confort des voyageurs : l'objectif est de limiter l'accélération verticale à 1 m/s^2
 - Pour un tablier continu sur appuis simples, ou pour une succession de travées isostatiques de portée L, on se borne à limiter le rapport δ / L , où δ est la flèche verticale au droit d'une voie supportant obtenue soit sous la charge UIC71 $\times \Phi$, soit sous convoi réel.
 - Dans les autres cas, on doit faire une étude dynamique du confort, en modélisant la suspension des voitures et l'ouvrage.

Méthodes de construction envisagées

Lancement de la charpente sur des palées provisoires :
Les tronçons successifs sont soudés temporairement les uns aux autres



Rôles de la maîtrise d'oeuvre travaux

Rémy Martz - Setec

Présentation générale du projet

- 140 km de ligne nouvelle en première tranche
- Maîtrise d'Ouvrage assurée par Réseau Ferré de France
- 3 tronçons de Maîtrise d'Ouvrage
- 2 gares nouvelles à proximité de Besançon et Belfort-Montbéliard



Présentation de l'allotissement et des travaux

TRONCON A - LOTS OPA1

- Rétablissement de deux routes départementales
- 2 ponts-routes
- Groupement d'entreprises : Roger Martin / SNCTP

TRONCON A - LOTS OPA2

- Préchargements au droit des blocs techniques des ouvrages de franchissement de la vallée de la Saône
- Groupement d'entreprises : GTM Terrassement / Roux

TRONCON A - LOT A1/A2

- 7,6 km de longueur totale
- Viaduc de la Saône : viaduc bipoutre mixte de 380 m de longueur
- 3 estacades de 960 m de longueur totale pour le franchissement de la vallée de la Saône
- 900 000 m3 de déblai, 700 000 m3 de remblai
- Groupement d'entreprises : GTM GCS / GTM Terrassements / Roger Martin / Baudin Chateaufort / Weiler / Sacer / Eurovia / Ménard Soltraitements

TRONCON A - LOT A3

- 18 km de longueur totale
- 21 ouvrages courants (16 ponts-routes, 1 pont-rails, 4 ouvrages hydrauliques)
- 1,9 million de m3 de déblai, 900 000 m3 de remblai
- Groupement d'entreprises : Guintoli / Valérian / Spie Batignolles / Bonnefoy



TRONCON A - LOT A4

- 29,1 km de longueur totale
- 51 ouvrages courants (26 ponts-routes, 15 ponts-rails, 10 ouvrages hydrauliques)
- 3,5 millions de m3 de déblai, 1,9 million de m3 de remblai
- Groupement d'entreprises : DTP / Bec / STD / Pertuy / Norpac



TRONCON C - LOT OPC1

- Rétablissement de 2 routes départementales
- 1 pont-route
- Groupement d'entreprises : Roger Martin / Locatelli / SMBTP / Parietti



TRONCON C - LOT C1

- 6,3 km de longueur totale
- 1 tunnel (tunnel de Chavanne : 2 km de longueur)
- 1 tranchée couverte (tranchée couverte d'Aibre-Trémoins : 170 m de longueur)
- 5 ouvrages courants (2 ponts-routes, 3 ponts-rails)
- 1,5 million de m3 de déblai, 700 000 m3 de remblai
- Groupement d'entreprises : Spie Batignolles / GTM Terrassement / Deschiron / Valérian / GTM GCS / Campenon Bernard / Chantier Moderne / Bonnefoy / Eurovia / Sacer



TRONCON C - LOT C2

- Inclus géographiquement dans le lot C1
- 2 viaducs (viaduc du Pertuis, bipoutre mixte de 220 m de longueur, et viaduc d'Aibre-Trémoins, bipoutre mixte de 250 m de longueur)
- Groupement d'entreprises : Demathieu et Bard / Eiffel



TRONCON C - LOT C3

- 21,4 km de longueur totale
- 26 ouvrages courants (11 ponts-routes, 11 ponts-rails, 3 passages grande faune, 1 ouvrage hydraulique) et 9 écrans acoustiques
- 1 viaduc
- 3,9 millions m3 de déblai, 1,9 million m3 de remblai
- Groupement d'entreprises : Razel / Demathieu et Bard / Colas



TRONCON C - LOT C4

Inclus géographiquement dans le lot C3
 2 viaducs (viaduc des Epenottes, bipoutre mixte de 450 m de longueur, et viaduc de la Lizaine, bicaisson mixte de 717 m de longueur)
 Groupement d'entreprises : Eiffage / Eiffel / Forezienne d'Entreprise



TRONCON C - LOT C5

- Inclus géographiquement dans le lot C3
- 1 viaduc (viaduc de la Savoureuse, ouvrage mixte de 792 m de longueur
- Groupement d'entreprises : Eiffel / Eiffage / SPIE/ Forezienne d'Entreprise



Le projet de construction dans ses grandes lignes
Raphael Schaeffer - Eiffel CM
Vincent Crespin - Eiffage

Réalisation des piles





Lançage



La construction métallique (tétrapodes et superstructures, études d'exécution, préfabrication, fabrication et montage)

Guillaume Garnier & Patrice Schmitt - SNCF

Raphael Schaeffer - Eiffel CM

SNCF / IGOA est intervenu pour le compte du groupement Eiffel-Eiffage :

- Étude d'une variante de conception à la solution de base du maître d'œuvre

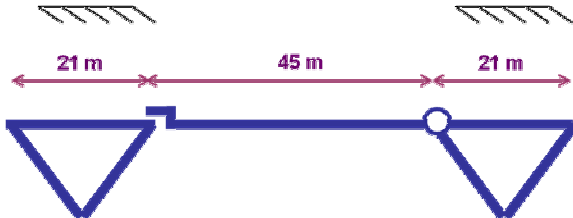
- Réalisation des études d'exécution (métal) de cette solution

Les objectifs recherchés lors de l'élaboration de la variante ont été :

- Une meilleure adéquation du comportement de la structure avec les spécificités des actions ferroviaires et les exigences de la voie
- Une optimisation des quantités de matières pour diminuer le prix de l'ouvrage et en faciliter la réalisation

Le schéma statique longitudinal de l'ouvrage a été revu

- Les contraintes :
 - Impossibilité de réaliser un ouvrage continu, car le profil en long est incompatible avec la pose d'un appareil de dilatation de la voie
 - Nécessité de limiter les impacts des variations thermiques sur la géométrie de la voie.



- Succession de tétapodes avec traverses encastrées et travées isostatiques

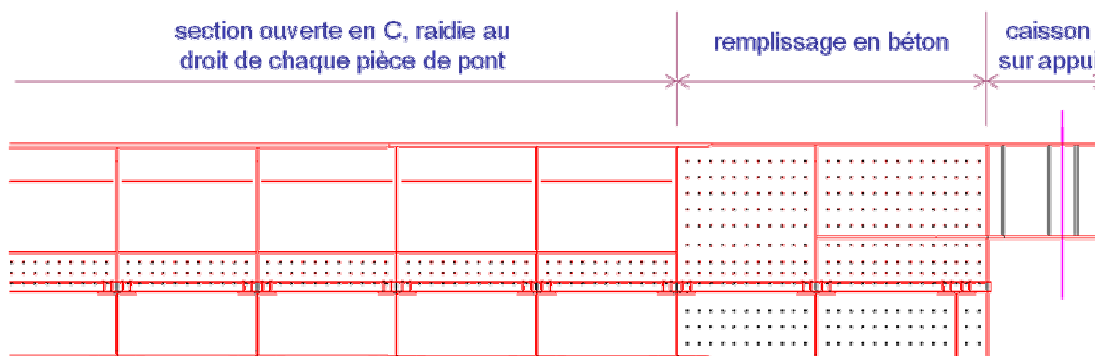
La structure transversale choisie

- Les objectifs recherchés :
 - Limiter le poids du hourdis (zone sismique)
 - Limiter les impacts des variations thermiques sur la géométrie de la voie.
 - Garantir une rigidité verticale de la structure transversale suffisante pour éviter les amplifications dynamiques

Caractéristiques de la structure transversale

- Poutres latérales en profilés ouverts (C) de 4,00 m de hauteur
 - semelles 1080 * 85 max
 - âmes épaisseur 24 mm
- Des pièces de pont en PRS de 1,25 m de haut
 - semelles 700 * 30 (sup) et 50 (inf)
- Une dalle fine (30 cm) en poutrelles enrobées (HEA 200 au pas de 65 cm) pour faciliter la réalisation, connectée sur les pièces de pont
 - poutrelles boulonnées sur les pièces de pont
 - relevés (longrine) connectés aux poutres transversales

Les poutres longitudinales



- Le caisson d'extrémité est nécessaire au centrage de la charge sur l'appareil d'appui. Il est raidi et non visitable.
- Le remplissage en béton a plusieurs fonctions :
 - Recentrage progressif de l'effort tranchant pour permettre son transfert entre l'âme excentrée de la section en C et les deux âmes du caisson d'extrémité
 - Raidissage de la section transversale à l'extrémité des travées isostatiques, pour limiter la flèche des pièces de ponts et améliorer le comportement dynamique
 - Blocage du gauchissement de la section en C, (qui travaille en torsion gênée) de manière à limiter sa rotation sous l'effet des charges verticales
- Il a été préféré à une solution métal (âme en sifflet, difficile à réaliser)
- Son fonctionnement suppose une bonne connexion (connecteurs + armatures) avec les âmes et les semelles des poutres

La conception parasismique

L'ouvrage est classé en zone sismique 1.b (décret 14/05/1991) :

- accélération nominale $a_n = 2,0 \text{ m/s}^2$
- sol de type S1

Il convient de vérifier :

Le non-effondrement sous le séisme de référence (ELU) - PS 92

- Les critères spécifiques des ponts-rails sous des séismes moins violents, mais plus fréquents (ELS sismique) :
 - non-endommagement de la structure
 - limitation des déformations à des valeurs compatibles avec la sécurité des circulations à la vitesse d'exploitation

- Les périodes fondamentales sont de 0.75 s (trans.) et 0.65 s (long.)
- L'ouvrage reste élastique même à l'ELU - ELS non dimensionnant
- Il a été choisi de transmettre les efforts sismiques intégralement par les appareils d'appuis (absence de butées).
- Pour cela tous les appareils d'appuis sont bloqués transversalement :
 - Transmission des efforts plus harmonieuse aux chevêtres - tétrapodes
 - Autre avantage : raidissage des pièces de ponts d'about
 - Pas de problème d'emprisonnement d'effort car les structures portées (tablier) et portantes (traverses) ont des inerties thermiques voisines
 - Les efforts résultants de l'absorption des jeux (0.5 mm) sont pris en compte

Le comportement dynamique

- Le référentiel demande de vérifier le comportement de l'ouvrage vis-à-vis des sollicitations dynamiques :
 - phénomène physique : le passage des essieux, régulièrement espacés, est assimilable à une excitation périodique, entretenant un mouvement forcé
 - la réponse dépend des fréquences propres de la structure et du pourcentage d'amortissement ξ ($\approx 0,5 \%$ pour un ouvrage métallique)
- 10 trains sont pris en compte (modèle HSLM-A) avec des écartements de bogies variables, qui couvrent tous les trains à grandes vitesses
- Les vitesses sont choisies dans une gamme [0 ; 420 km/h] ($1,2 \times$ vitesse d'exploitation de la ligne)
- On doit vérifier que :
 - l'accélération du tablier reste inférieure à $3,5 \text{ m/s}^2$
 - Les sollicitations dynamiques résultantes ne sont pas dimensionnantes

Optimisation de l'ouvrage

- L'ouvrage proposé en variante répond en totalité au cahier des charges de la LGV Rhin-Rhône, tant en situation normale qu'en cas de séisme, vis-à-vis des Etats Limites Ultimes et des Etats Limites de Service.
- Du point de vue réglementaire, le référentiel technique de la LGV Rhin-Rhône (tome IV) renvoie aux règlements français en vigueur (en particulier le fascicule 2.01) ainsi qu'aux Eurocodes (EN 1991-2) pour les vérifications dynamiques.
- De façon complémentaire, les vérifications d'interaction voie-ouvrage ont été réalisées selon l'EN 1991-2 selon les principes décrits précédemment.

Conclusions

- La conception du viaduc de la Savoureuse lui permet de respecter l'intégralité des critères de dimensionnement.
- Parmi ces derniers, les spécificités ferroviaires que sont la dynamique, le confort et l'interaction voie-ouvrage se sont montrées particulièrement décisives.
- L'optimisation est restée un objectif permanent, depuis la naissance de la variante jusqu'au terme des études d'exécution.

Quelques photos de chantier

