

Diagnostic, réparation et maintenance

DIAGNOSTIC ET RÉPARATION DE 4 VIADUCS MÉTALLIQUES EXCEPTIONNELS DE TYPE EIFFEL

DIAGNOSIS AND RESTORATION OF 4 EXCEPTIONAL EIFFEL-TYPE RAIL VIADUCTS

Cédric LAMARSAUDE¹, Renaud LECONTE², Christophe RAULET³, Claire DEFARGUES⁴

¹ Ingénieur chargé d'études, DIADES - cedric.lamarsaude@diades.fr

² Directeur technique, DIADES - renaud.leconte@diades.fr

³ Directeur général, DIADES - christophe.raulet@diades.fr

⁴ Directeur de projet, SETEC FERROVIAIRE - claire.defargues@ferro.setec.fr

1. CONTEXTE DE L'OPÉRATION

Dans le cadre du Plan Rail Auvergne signé entre l'État, la Région Auvergne et Réseau Ferré de France (RFF), d'importants travaux de rénovation des infrastructures ferroviaires – travaux de voie, d'ouvrages d'art, de tunnel et d'ouvrages en terre – ont été réalisés sous la maîtrise d'œuvre de SETEC.

Ces travaux consistaient à sécuriser, moderniser ou remettre à niveau trois lignes ferroviaires auvergnates, dont celle de Bordeaux Lyon entre Montluçon et Gannat – lignes 705000 et 707000, notamment en supprimant et en prévenant de nombreux ralentissements.

La ligne de Montluçon Gannat, ouverte en 1868, comprend quatre viaducs métalliques exceptionnels dont deux ont été

réalisés par la jeune Compagnie Eiffel et les deux autres par la Compagnie de Fives Lille.

En tant que maître d'œuvre de spécialité, DIADES avait notamment la responsabilité du diagnostic de ces quatre viaducs.

Une fois les archives des viaducs rassemblées et analysées, la mission consistait à effectuer un diagnostic complet intégrant de nombreuses investigations (inspections détaillées, mesures dimensionnelles, diagnostic anticorrosion, spectrocolumétrie, prélèvement d'échantillons et leurs analyses, épreuves et instrumentation des ouvrages, recalculs des structures avec des calculs de fatigue,...) puis la définition du programme de régénération et de remise en peinture de deux viaducs en tenant compte de la problématique du plomb dans les anciennes peintures.

Les travaux présentés ont été réalisés sur le viaduc du Rouzat par l'entreprise Lassarat sous la maîtrise d'œuvre de DIADES.

2. PRÉSENTATION DES OUVRAGES

Le viaduc du Rouzat (figure 1) et le viaduc de Neuviel (figure 2), construits par G. Eiffel entre 1867 et 1869, se trouvent dans le département de l'Allier, sur la ligne à voie unique de Commentry à Gannat. Ils sont respectivement situés aux km 386.840 et 388.813, entre les gares de GANNAT et BELLENAVES.

Ces deux ouvrages sont inscrits à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques depuis 1965.

Le viaduc du Rouzat se situe sur le territoire de la commune de SAINT-BONNET-DE-ROCHEFORT. Il comporte 3 travées métalliques de 55,125 m – 57,75 m – 49,125 m prolongées par un viaduc d'accès en maçonnerie de 13 m environ côté Commentry. Le tablier en fer puddlé de 162 m de long repose sur deux piles composées chacune de 4 colonnes creuses en fonte d'une cinquantaine de centimètres de diamètre, munies de jambes de force ou arbalétriers dans le sens transversal et appuyées sur un massif en maçonnerie ; les parties métalliques des piles ont une hauteur respective de 46 et 41 m. La pile côté Commentry est fondée au milieu de la rivière la Sioule.

Le viaduc de Neuviel se situe quant à lui sur le territoire de la commune de BEGUES. Il comporte 2 travées métalliques de 49,20 m prolongées par un viaduc d'accès en maçonnerie de 31 m environ côté Commentry et d'une tra-

vée annexe métallique de 23,50 m côté Gannat. Le tablier en fer puddlé de 98,40 m de long repose sur une pile composée de quatre colonnes creuses en fonte d'une cinquantaine de centimètres de diamètre d'une hauteur de 41,50 m et appuyées sur un massif en maçonnerie.

Les tabliers de ces deux ouvrages présentent une largeur de 4,50 m entre garde-corps. Ils sont constitués de poutres latérales à treillis, d'une hauteur hors cornières de 4.00 m et un entre axes de 3,50 m. Des pièces de pont sont espacées de 3,00 m et supportent des longerons en acier qui ont été remplacés en 1965. Enfin, l'intérieur du tablier est équipé d'une passerelle fixe permettant son inspection.



Figure 2 : Viaduc de Neuviel.

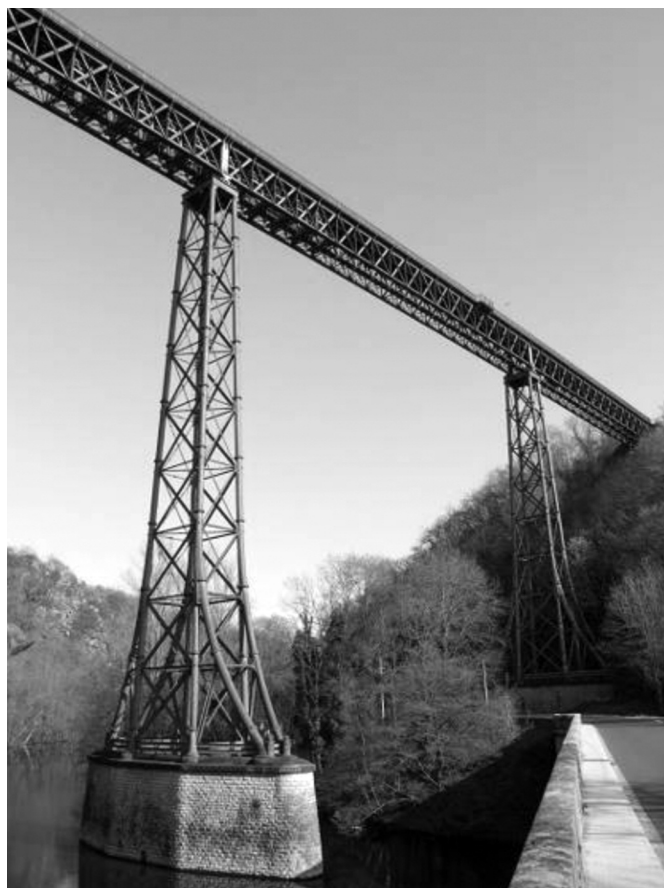


Figure 1 : Viaduc du Rouzat.

Le viaduc du Bellon (figure 3) et le viaduc de la Bouble (figure 4), construits par J.F. Cail et la compagnie Fives-Lille entre 1867 et 1869, sont également situés sur la ligne de Commentry à Gannat. Ils sont respectivement aux km 368.212 et 363.637, entre les gares de LOUROUX de BOUBLE et BELLENAVES. Les ouvrages se situent à cheval sur les territoires des communes de LOUROUX de BOUBLE et COUTANSOUZE pour le Bellon et de LOUROUX de BOUBLE et ECHASSIERES pour la Bouble.

Ces deux ouvrages sont inscrits à l'inventaire des monuments historiques naturels et des sites de caractère artis-



Figure 3 : Viaduc du Bellon.

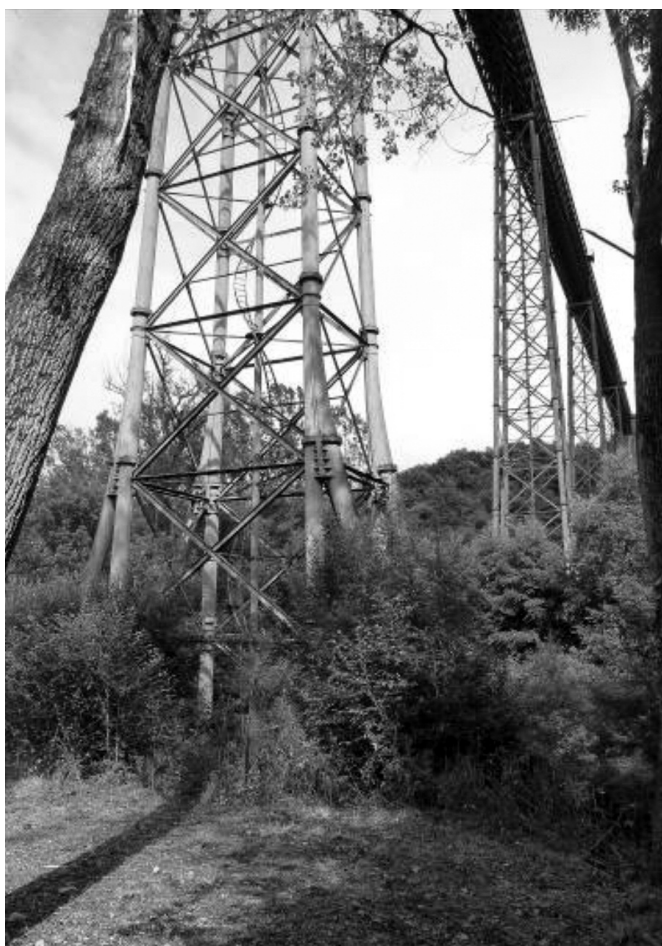


Figure 4 : Viaduc de la Bouble.

tique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque du département de l'Allier depuis 1991.

Le viaduc du Bellon comporte 3 travées de 40,00 m – 48,00 m – 40,00 m encadrées par deux viaducs d'accès en maçonnerie de 57,80 m côté Commentry et 42,00 m côté Gannat. Le tablier en fer puddlé de 128 m de long repose sur deux piles composées chacune de 4 colonnes creuses en fonte d'une cinquantaine de centimètre de diamètre et appuyées sur un massif en maçonnerie ; les parties métalliques ont une hauteur de 36 m.

Le viaduc de la Bouble comporte 6 travées de 50,00 m encadrées par deux viaducs d'accès en maçonnerie de 71,30 m côté Commentry et 23,70 m côté Gannat. Le tablier en fer puddlé de 395 m de long repose sur cinq piles composées chacune de 4 colonnes creuses en fonte d'une cinquantaine de centimètres de diamètre, munies de jambes de force dans le sens transversal et appuyées sur un massif en maçonnerie ; les parties métalliques ont une hauteur variant de 40 m à 55 m environ, amenant l'ouvrage à environ 70 m au-dessus de la vallée de la Bouble (figure 5).

Les tabliers de ces deux ouvrages présentent une largeur de 4,50 m entre garde-corps. Ils sont constitués de poutres latérales à treillis multiples d'ordre 4 et ont une hauteur hors cornières de 4,54 m et un entre axes de 3,50 m. Les pièces de pont sont espacées de 2,00 m et supportent des longerons en acier qui ont été remplacés en 1965. Enfin, l'intérieur du tablier est équipé d'une passerelle fixe permettant son inspection, également remplacée en 1965.



Figure 5 : Construction du viaduc de la Bouble.

© gallica.bnf.fr - École nationale des ponts et chaussées.

3. LE DIAGNOSTIC DES OUVRAGES

3.1. Programme du diagnostic

Dans le cadre de cette étude, la phase préalable de diagnostic avait pour objectif de conclure sur l'état général de ces ouvrages en s'assurant de leur aptitude à satisfaire le service attendu, en termes de charge et de fréquence. Le cas échéant, les mesures de renforcement définitives nécessaires pour assurer ce service et les mesures de renforcement provisoires pour mettre en œuvre les méthodologies nécessaires pour la réalisation des travaux de régénération dans de bonnes conditions ont été définies.

Afin de compléter la connaissance des ouvrages basée en premier chef sur les données constituant les dossiers d'ouvrage, des investigations particulières ont été menées et notamment :

- des visites sommaires réalisées en travail acrobatique (figure 6) et complétées de nuit à partir d'une nacelle négative sur wagon (figure 7) visant à mettre à jour la connaissance des pathologies présentes sur les ouvrages (déconsolidation, foisonnement, fissuration éventuelle,...),
- la prise de relevés dimensionnels complémentaires nécessaires aux modélisations et études structurales (figure 8) et la reconstitution des plans de charpente correspondants,
- la réalisation de contrôles magnétoscopiques de quelques assemblages visant à rechercher, dans des zones sensibles, des dommages non perceptibles à l'œil,
- la réalisation d'un diagnostic anticorrosion mettant notamment en évidence la présence de minium de plomb dans le système anticorrosion en place,
- la recherche par spectrocolorimétrie des teintes des peintures d'origine, à la demande des Architectes des Bâtiments de France (ABF),
- le prélèvement d'échantillons et leurs analyses chimiques et mécaniques pour fiabiliser la connaissance des

matériaux en place (figure 9) et permettre la définition d'hypothèses réalistes pour la réalisation des études structurales,

- la réalisation de modèles de calculs complets des ouvrages sous le logiciel Pythagore®, développé par Setec TPI,
- et enfin la réalisation de chargements d'essais de nuit couplés à une instrumentation visant à étudier les flèches des tabliers, les déformations de quelques sections et les rotations à proximité des appuis pour permettre de caler les modèles numériques nécessaires à une étude robuste des ouvrages.

3.2. Les études structurales

La présence de plomb dans les anciennes peintures a conduit à la nécessité de mise en œuvre de confinements étanches visant à éviter toute pollution de l'environnement. Ces confinements présentaient une prise au vent très importante sur des structures en treillis très ajourées, nécessitant des vérifications structurales des méthodes de travaux dès la phase des études de conception. Au stade du projet, les hypothèses consistaient à utiliser un échafaudage roulant de 20 à 21 ml en fonction des ouvrages, en parallèle du confinement total d'une pile et sur la base de la technique de l'abrasif recyclé.

Des modèles globaux de chaque ouvrage ont été réalisés par SETEC TPI et DIADES sur le logiciel Pythagore®, de manière à vérifier structurellement les ouvrages sous ces cas de charges inhabituels et s'assurer, dans toutes les phases de chantier, du respect de leur capacité portante.

Ces modèles ont été bâtis à partir des résultats des investigations complémentaires et plus particulièrement des relevés dimensionnels pour la reconstitution de la géométrie de détail, et des résultats des prélèvements d'échantillons pour les caractéristiques des fers puddlés. De manière à fiabiliser les résultats des calculs prédictifs du comportement de ces ouvrages, les modèles ont été calés sur la base de l'instrumentation et des chargements d'essais réalisés en phase de diagnostic (figure 10).



Figure 6 : Visite en travail acrobatique.



Figure 7 : Utilisation d'une nacelle négative sur wagon.

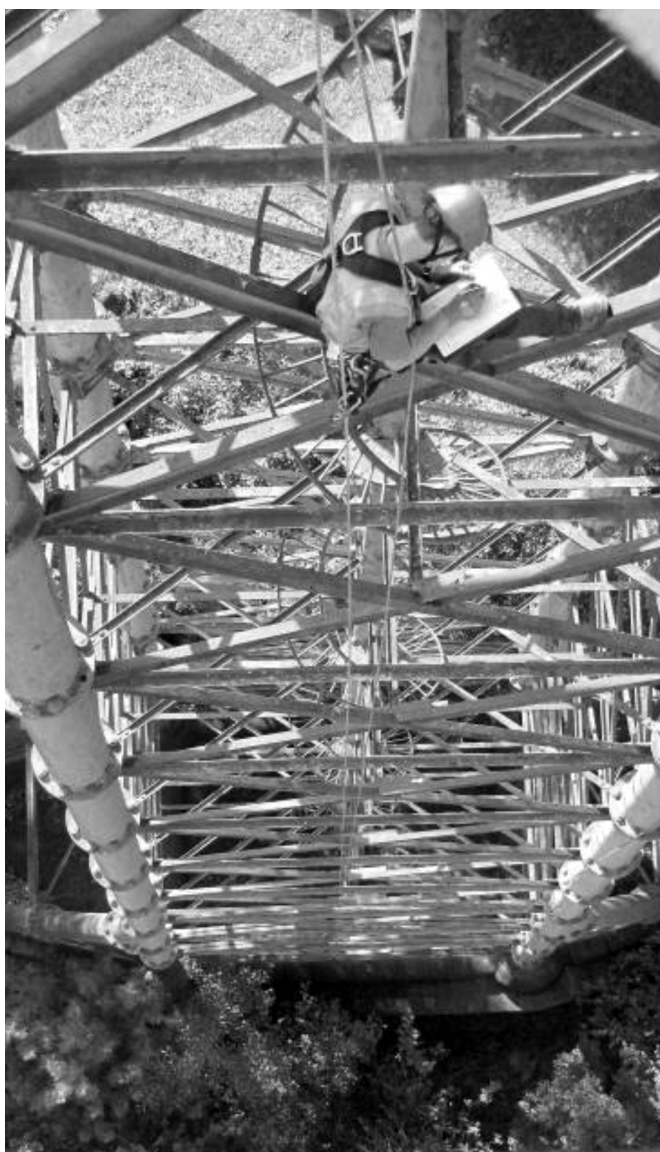
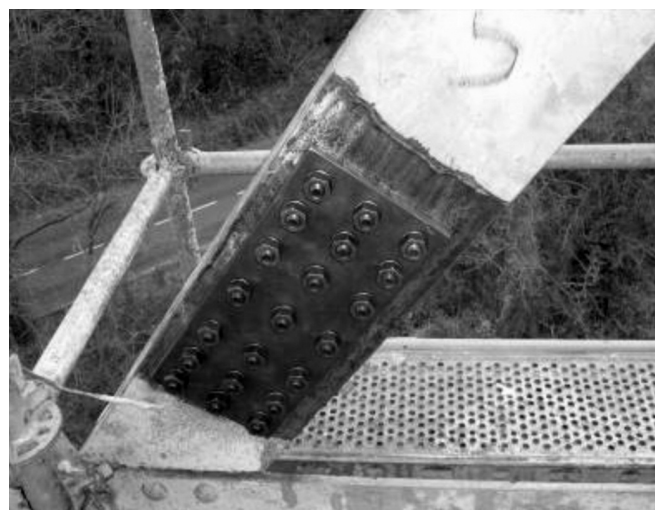


Figure 8 : Relevés dimensionnels.



MACROGRAPHIE : REACTIF :
Macrographic etching Reagent

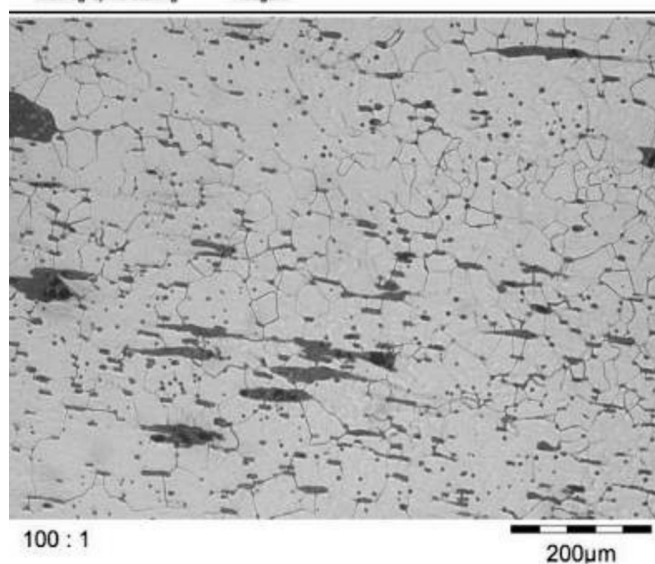


Figure 9 : Analyse des fers puddlés.

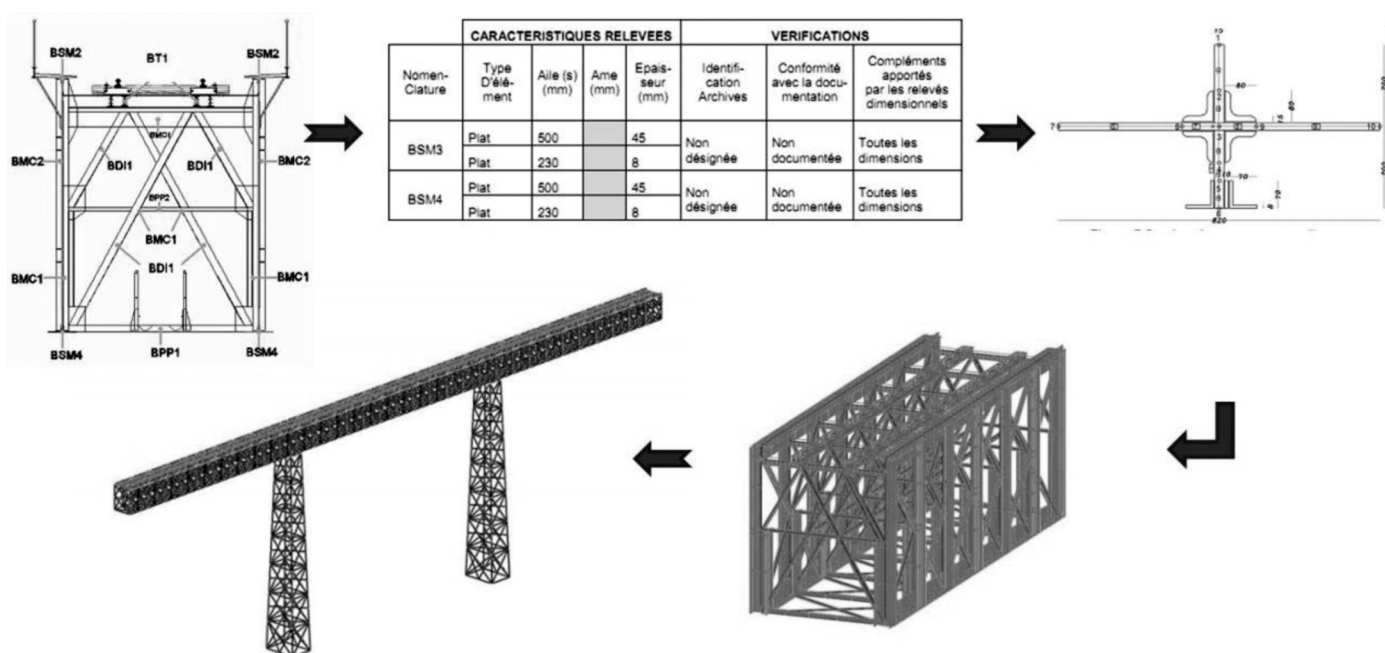


Figure 10 : Modélisation des ouvrages sous Pythagore ©.

3.3. Les calculs en fatigue

Compte tenu de l'âge de ces 4 viaducs métalliques, des calculs de vérification vis-à-vis des phénomènes de fatigue ont été réalisés afin d'appréhender les zones sensibles par un cumul d'endommagement théorique des différents assemblages.

Sur la base d'estimations faites sur le trafic depuis 1869 et des comptages disponibles sur la période de 2000 à 2007, un histogramme de chargement a été élaboré. Il distinguait les trains de fret et les trains voyageurs. Pour chaque assemblage sensible, un calcul de cumul d'endommagement a été réalisé après avoir déterminé les histogrammes de contraintes par la méthode de la goutte d'eau à l'aide du logiciel Pythagore ®. Les résultats mettaient en avant un endommagement cumulé théorique parfois bien supérieur à 1 et tendant à mettre en évidence un endommagement potentiel dans certaines sections.

Afin de lever le doute quant à la présence de fissures de fatigue, des investigations complémentaires ont été réalisées par magnétoscopie (pour les assemblages simples) et par radiographie (pour les assemblages présentant plus de 2 plats) sur les zones sensibles identifiées préalablement par le calcul. Les contrôles par radiographie ont été menés à l'aide d'une source d'iridium 192 et de doubles films D4 et D5.

Ces investigations n'ont pas fait apparaître de pathologies structurelles importantes et ont conforté le Maître d'Ouvrage dans sa décision d'investir dans la remise en peinture des ouvrages.

4. RÉALISATION DES TRAVAUX DE RÉGÉNÉRATION DU VIADUC DU ROUZAT

4.1. La préparation des travaux

En définitive, à l'issue d'un processus complet de consultation pour deux ouvrages, seul le viaduc du Rouzat a fait

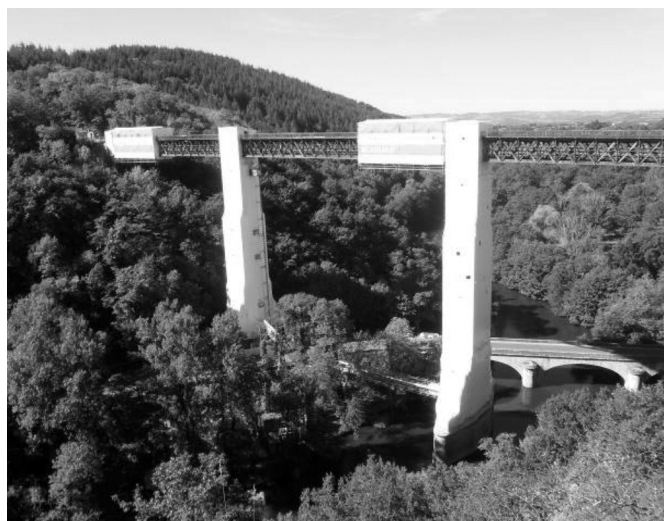


Figure 11 : Masque au vent généré par les confinements.

l'objet de travaux de régénération et de remise en peinture au second semestre 2013. L'entreprise Lassarat était en charge de ce chantier sur une proposition de variante consistant à utiliser deux échafaudages roulants de 18 ml sur le tablier concomitamment au confinement total des deux piles (figure 11). La technique de l'abrasif perdu a été employée.

De manière à s'assurer de la faisabilité technique de cette variante dans un délai contraint de fermeture de voie, une étude spécifique a été réalisée durant la période de préparation en étroite collaboration entre l'entreprise Lassarat, avec ses bureaux d'études IOA et SEMI, et le maître d'œuvre DIADES. Elle visait à s'assurer que les renforts pouvaient être mis en œuvre sans percement de la structure existante.

Les études engagées dans le cadre de cette variante ont mis en évidence la nécessité de réaliser des renforts provisoires au niveau des contreventements inférieurs du tablier (excès de compression et risque de flambement) par pinces et des zones de dédoublement des fûts des piles au droit des arbalétriers (traction excessive dans la fonte). Les piles en fonte ont été précontraintes partiellement de 80 tonnes avec un ancrage du dispositif dans la maçonnerie de 20 tonnes par fût.

Enfin, une procédure de gestion spécifique des phénomènes de vent a été rédigée pour programmer le dé-confinement partiel d'urgence des échafaudages roulants au-delà d'une certaine vitesse de vent limite définie.

Compte-tenu de l'exiguïté du site et des hauteurs importantes, ces opérations ont nécessité la mise en œuvre de moyens de manutention conséquents. À ce titre, une grue de 120 tonnes a été déployée pour l'amenée des colliers de renforts des piles nécessitant la fermeture de la RD 37 franchie par l'ouvrage.

Les échafaudages des piles ont été montés en temps masqué à partir du 15 avril 2013, hors arrêt de la circulation des trains sur l'ouvrage, l'accès au tablier étant, pendant toute cette partie des travaux, strictement interdit.

Dès la mise à disposition de l'intégralité de l'ouvrage à l'entreprise le 24 juin 2013, une grue de 200 tonnes a permis la mise en œuvre des échafaudages roulants sur le tablier (figure 12).



Figure 12 : Mise en œuvre des échafaudages roulants par grue de 200 t.

4.2. La réalisation des travaux

La Sioule étant régulée par un barrage en amont, la base vie a pu être installée le long de la rivière sans craindre les inondations. Ainsi deux bureaux, une salle réfectoire et des douches et vestiaires suffisants pour une vingtaine de compagnons ont été installés en contrebas de la route. À proximité, la production d'énergie, d'air comprimé asséché, le dispositif amphitec servant à l'aspiration des résidus de sablage ainsi que l'atelier peinture ont également trouvé leur place (figure 13).

Toute la place autour de la pile le long de la route a également été exploitée. On y trouve l'ascenseur, élément indispensable pour acheminer les équipes et le matériel à 52 m au-dessus de la route en optimisant les temps de travail, un sas trois compartiments pour la gestion du risque plomb, puis tout l'atelier de sablage et de filtration. Les sableuses ont été rassemblées dans un conteneur, au-dessus duquel a été disposé un conteneur réservoir d'abrasif (figure 14). Cette installation, développée par Lassarrat, a permis une alimentation gravitaire des sableuses, avec un minimum de manutention et une très bonne optimisation des temps de coupe. La proximité avec la route a simplifié également l'approvisionnement d'abrasif, qui était alors assuré par camion silo. L'espace a été utilisé pour la récupération des résidus de sablage au moyen d'un caisson étanche permettant l'ensachage automatisé en big-bag étanche de 1,2 m³. Ce système est également utilisé dans le cas de chantier avec risque amiante. Enfin, la centrale de renouvellement d'air avec filtrage total d'une capacité de 60 000 m³ par heure permettait d'obtenir un recyclage de l'air dans le confinement : entre 6 et 8 volumes par heure, suivant les sections.

Pour assurer la sécurité des compagnons vis-à-vis des risques routiers, une passerelle permettait le passage des hommes et des réseaux au-dessus de la RD 37.

En raison de la présence de plomb, les opérations de sablage ont dû être réalisées en milieu confiné. Celui-ci était réalisé avec des bâches thermosoudables d'une épaisseur de 230 µm au niveau des parois hormis pour le sol des échafaudages roulants du tablier qui était de 600 µm. Des entrées d'air étaient disposées judicieusement pour assurer son renouvellement dans l'enceinte, placée en dépression



Figure 13 : Installation de chantier.



Figure 14 : Système de sablage.

au moyen de la centrale d'aspiration dédiée. Les zones exiguës où les opérateurs risquaient de perforer le confinement ont été protégées par des plaques de contreplaqué ou un doublage de la bâche. Par ailleurs, des examens médicaux avec prise de sang préalables au chantier puis mensuellement ont été réalisés sur l'ensemble des opérateurs afin de suivre le risque de plombémie.

Une démarche préalable de concertation en phase de conception avait d'ailleurs été initiée auprès de la CARSAT, de la CRAM et de l'OPPBTP afin d'appréhender les risques et inclure toutes les prescriptions nécessaires à la santé et à la sécurité, notamment des travailleurs, ainsi qu'à la protection de l'environnement, dans le marché de travaux.

Pour la gestion du risque « vent », des anémomètres ont été placés en différents endroits de la structure. La procédure de dé-confinement d'urgence, couplée à une consultation des prévisions météorologiques, a fait l'objet d'un suivi strict en cas de vents violents. Les prévisions permettaient d'anticiper cette situation et ainsi d'organiser le chantier afin de ne pas générer de risque environnemental en cas d'ouverture du confinement.

Lors des épreuves de convenance, une difficulté particulière pour le décapage des piles en fonte a été détectée. La fonte se trouvait irrégulièrement couverte de calamine adhérente. Afin d'obtenir une protection anticorrosion régulière sur l'ensemble de la surface, il a été décidé de supprimer toutes traces de calamine et d'obtenir un décapage de qualité Sa2 ½.

Par ailleurs, cet ouvrage ancien est constitué essentiellement de cornières, assemblées par rivetage, ce qui génère de nombreuses aspérités et entrefers. Ces surfaces sont donc très chronophages à décaper : une bonne expérience du sablage est requise pour obtenir une rugosité de type moyen G sans écrouir le fer à force de le marteler avec l'abrasif.

La consommation d'abrasifs, lors du pic de production obtenu par deux équipes de six sableurs travaillant en deux postes, a atteint 27 tonnes par semaine.

Les sableurs étaient équipés d'un casque intégral avec une jupe descendant sur les épaules, et d'une visière en verre afin de les protéger des projections d'abrasifs dues aux rebonds contre le subjectile. La plaque de verre était régulièrement changée car polie par l'abrasif.

Chaque opérateur était alimenté en air frais par l'intermédiaire d'un masque intégral au moyen d'un compresseur équipé de filtres adéquats, placé sous le casque.

Le renouvellement d'air, à raison de 6 volumes par heure minimum, permettait de conserver une visibilité correcte dans l'enceinte du sablage.

Le nettoyage a été assuré en plusieurs étapes. Tout d'abord un maximum de résidus était aspiré. L'ensemble des surfaces était ensuite balayé et soufflé et une nouvelle aspiration pouvait être réalisée. Enfin, un dernier soufflage, à l'air sec pour ne pas provoquer de corrosion de l'acier mis à nu, était nécessaire avant la mise en peinture.

La mise en peinture a été réalisée depuis le haut, de manière à ne pas risquer de déposer des particules, souvent présentes dans les éléments d'échafaudage, sur les surfaces fraîchement traitées.

L'application de la peinture a suivi un protocole spécifique. Les conditions climatiques étaient déterminantes. Suivant les tolérances de la peinture appliquée, l'hygrométrie devait être inférieure à 85 % d'humidité relative, la température ambiante comprise entre 3 et 35 °C et la température du subjectile à une température au minimum supérieure de 3 °C par rapport au point de rosée. Ces conditions pouvaient être respectées naturellement ou au moyen d'assécheurs d'air et de systèmes de chauffages de l'enceinte confinée.

Des prétouches ont été réalisées à la brosse au niveau des angles et des rivets préalablement à l'application à l'air-

less des trois couches de peinture du système C4AMV afin de garantir les épaisseurs minimales exigées en tout point de la structure (figure 15).

Les travaux ont été réalisés sur une période totale de 8 mois avec une coupure de la ligne de 6 mois et une mise à disposition du tablier pour l'entreprise de 4,5 mois. La ligne a été restituée dans les délais et les circulations commerciales ont repris le 16 décembre 2013, sur un ouvrage remis « à neuf » (figure 16).

4.3. Les principales quantités

Dans le cadre des travaux de régénération du viaduc du Rouzat, il a été nécessaire de mettre en œuvre une surface de confinement de 6300 m², venant recouvrir environ 130 t d'échafaudages dont 13 tonnes par échafaudage roulant.

La surface découpée à l'issue du chantier a été de 10 200 m² générant ainsi un poids des déchets de 1 200 tonnes. Près de 1 500 litres de volume de peinture ont été mis en œuvre pour la réalisation des 3 couches du complexe anticorrosion.

En définitive, ce sont près de 9 000 heures travaillées par l'entreprise en travail en deux postes avec 24 opérateurs, 2 personnes d'encadrement et jusqu'à 8 sableurs en simultané.

4.4. Les intervenants du projet

La maîtrise d'œuvre générale de l'opération a été assurée par le groupe SETEC (SETEC FERROVIAIRE, SETEC TPI et DIADES) pour le compte de RFF (Réseau Ferré de France) en tant que Maître d'Ouvrage. Ce dernier était représenté par la SCET (Société Centrale pour l'Équipement du Territoire), ALGOE, EGIS et la SeAu (Société d'équipement de l'Auvergne).

Le diagnostic et la maîtrise d'œuvre des viaducs ont été réalisés par DIADES en tant que Maître d'œuvre de spécialité. La société IPRS a apporté une assistance ponctuelle au maître d'œuvre pour certaines particularités relatives à la protection anticorrosion.

Enfin, l'entreprise LASSARAT était mandataire de ce marché. Elle était assistée d'ENTREPOSE pour les échafaudages, ADS pour les travaux sur la charpente métallique, IOA en tant que bureau d'études d'exécution et SEMI pour les méthodes.



Figure 15 : Mise en œuvre du primaire.



Figure 16 : Dépose des derniers échafaudages et repose de la voie.