

CONSTRUIRE AVEC DE L'ACIER AUTOPATINABLE : IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET ÉCONOMIQUE - OA2 DU T7

**BUILD WITH WEATHERING STEEL :
ENVIRONMENTAL AND ECONOMICAL
IMPACTS - T7 TRAMWAY BRIDGE
IN PARIS AREA**

Loïc MICHEL et Eric GOGNY
SYSTRA
Direction Technique – Département Ponts





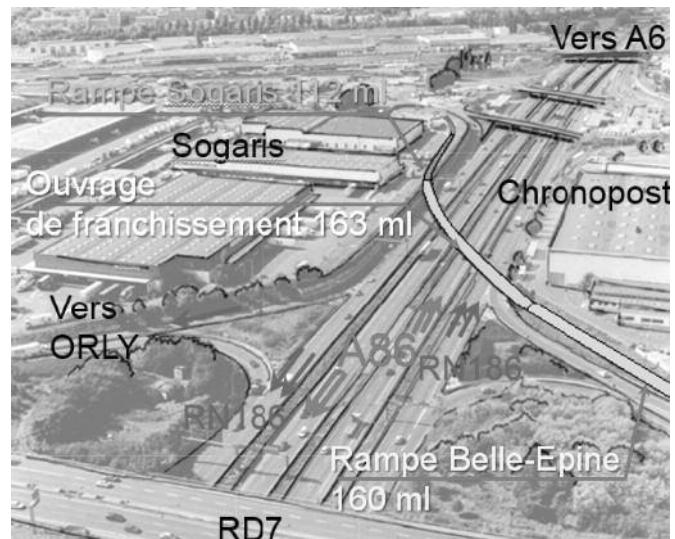
1. CONTEXTE/BUT DE L'ARTICLE

Le T7 est une nouvelle ligne de tramway sur fer en site propre qui relie Villejuif-Louis Aragon (Val de Marne) à Athis-Mons (Essonne). Cette ligne de 11 km, ponctuée de 18 stations, a été mise en service le 16 novembre 2013. Elle dessert les pôles d'activités de Rungis, d'Orly Sud et le centre commercial de Belle-Epine. SYSTRA était membre du groupement de maîtrise d'œuvre responsable du projet comprenant SETEC, les cabinets d'Architectes REICHEN & ROBERT et LAVIGNES-CHERON. SYSTRA a ainsi participé à la mission de maîtrise d'œuvre complète du lot 1 (voies, systèmes, ligne aérienne de contact, traction en ligne) et du lot 2 (Ouvrages d'Art). Au total, deux ouvrages d'Art existants ont été modifiés et cinq ouvrages d'Art neufs ont été réalisés. Nous présentons dans cet article le pont de franchissement de l'A86 et de la RN186, dit OA2. Le but de cet article est de montrer à travers un exemple concret, l'intérêt d'utiliser de l'acier autopatinable dans un contexte particulier, contraint (exploitation routière A86/RN186) afin de limiter l'impact environnemental d'un ouvrage d'art dans un cycle de vie global (notamment pour les phases travaux et maintenance future). Ainsi, cet article présente successivement une description globale et sommaire de l'ouvrage OA2, les contraintes majeures du projet, l'historique des études de conception réalisées, la solution retenue pour l'ouvrage de franchissement de la RN186/A86 après plusieurs études et réalisation d'une analyse multicritères, les détails spécifiques retenus liés à l'utilisation de l'acier autopatinable et

les avantages d'avoir opté pour la réalisation d'un pont mixte hybride avec un acier autopatinable S355W.

2. DESCRIPTION DE L'OA2 - PONT TRAMWAY DE FRANCHISSEMENT DE L'A86/RN186

Le pont tramway de franchissement de l'A86 et de la RN186, est un ouvrage se situant sur la commune de Rungis (94), au droit du marché international de RUNGIS.



Photos de l'ouvrage OA2 : vue de l'ouvrage de franchissement de la RN186/A86 et de la rampe SOGARIS.

L'ouvrage permet au tramway de franchir en passage supérieur les voies routières de la RN186 et de l'A86 (8 voies + 2 bretelles).

L'ouvrage créé porte deux voies de tramway et comporte trois ouvrages distincts :

- Un ouvrage de franchissement des voies de la RN186 et de l'A86 composé d'une structure mixte acier/béton posée sur 4 appuis (culées et piles béton),
- une rampe d'accès à l'ouvrage principal, constituée d'une estacade (rampe SOGARIS),
- une rampe d'accès à l'ouvrage principal, constituée d'un mur de soutènement (rampe Belle-Épine).

2.1. Rampe Belle-Épine

La rampe Belle-Épine, d'une longueur de 160 m, est constituée de 13 murs de soutènement successifs qui représentent une surface totale de soutènement de 1245 m². La pente longitudinale de la voie tramway au droit de cette rampe est de 0.95%. Elle permet, compte tenu de la pente de la bretelle d'entrée de la RN186 de 4% de dégager le gabarit routier requis au droit de l'ouvrage de franchissement. La hauteur des murs (partie visible) varie entre 1,85 m et 10,00 m.

2.2. Rampe SOGARIS

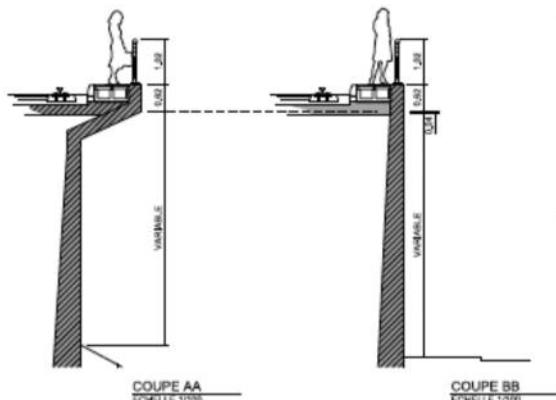
La rampe SOGARIS, d'une longueur de 112,10 m, est constituée d'une estacade en béton armé type pont-dalle avec 8 travées continues (2 travées de rive de portée 11,80 m et 6 travées intermédiaires de portées 14,75 m). La largeur du tablier est de 9,64 m. La dalle en béton arme du tablier a une épaisseur minimale de 65 cm à l'axe de l'ouvrage pour une portée courante de 14,75 m. Longitudinalement, la pente moyenne de la rampe est de 3,6%. L'extrados du tablier est composé d'un profil en travers en forme de double toit avec deux points hauts au droit de chaque voie ferrée.

Le tablier repose sur la pile-culée PC3 et des appuis intermédiaires fondés sur une file ou deux files de pieux de diamètre 1 m, de longueur variable entre 16 et 19 ml.

2.3. Ouvrage de franchissement des voies de la RN186 et de l'A86

Caractéristiques principales et tracé

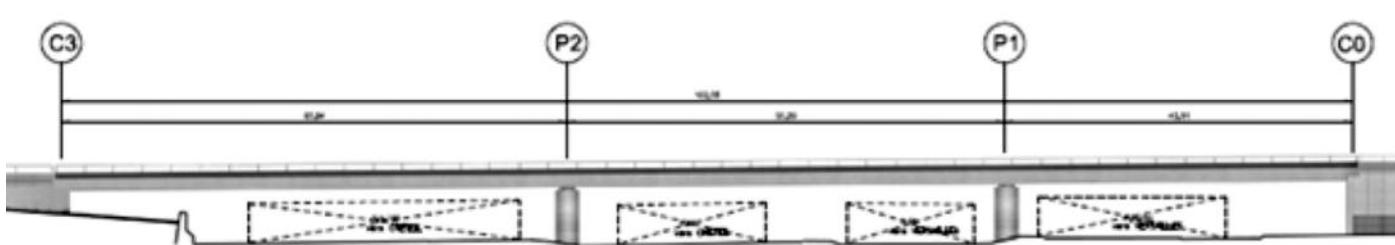
Cet ouvrage courbe, à trois travées continues de 44 m, 55 m et 64 m environ, est constitué d'un tablier de type caisson mixte acier béton (avec un profil en travers en



Extraits du cahier architectural (Source LAVIGNE-CHERON) de l'ouvrage OA2 – Photos de la rampe Belle-Épine.



Rampe SOGARIS



forme d'aile d'avion inversé), appuyé sur des piles et culées en béton armé fondés superficiellement. La largeur courante du tablier est de 9,64 m entre nus extérieurs des corniches et de 9,20 m entre nus extérieurs du caisson métallique.

La voie tramway est courbe sur une partie de l'ouvrage avant de devenir une clohoïde à l'approche de la culée C0 et de la rampe Belle-Épine. Le caisson étant de rayon constant ($R= 241.714$ m), l'encorbellement du tablier devient variable pour assurer le tracé du tramway côté rampe Belle-Epine. Ainsi, la largeur du tablier passe progressivement sur une longueur d'environ 12 ml d'une largeur courante de 9,20 m (hors corniches) à 9,525 m en about de tablier côté culée C0.

La pente longitudinale de l'ouvrage est constante avec une valeur 0.85%. Le profil en double toit transversal est assuré par le béton de la dalle de voie de l'ouvrage mixte, le hourdis béton du caisson métallique n'étant pas penté transversalement.

3. CONTRAINTES

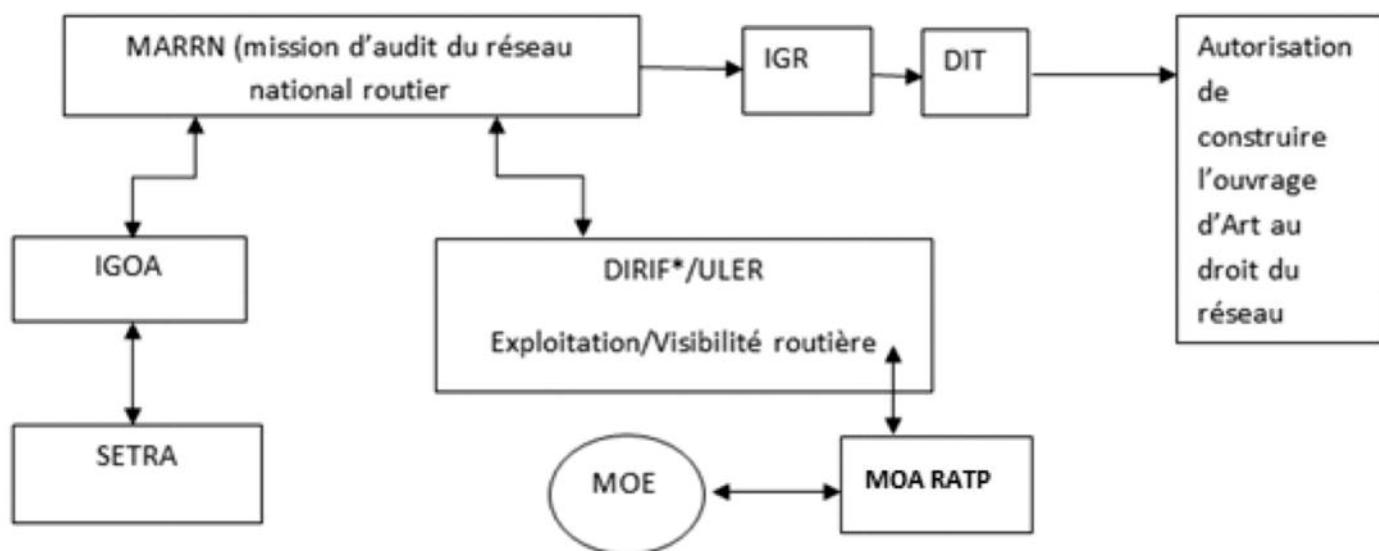
La conception de l'ouvrage s'est articulée autour de nombreuses contraintes, tant liées à la voie franchie qu'à la voie portée, en prenant en compte à la fois la réalisation et la maintenance future de l'ouvrage.

Circulaire 1994-56 du 05/05/1994 – Exploitation et visibilité routière

Le tracé du tramway T7 au droit de la RN186 et de l'A86 interfère avec le réseau routier national. Par application de la circulaire 1994-56 du 05/05/1994 qui fixe les modalités d'élaboration, d'instruction, d'approbation et d'évaluation des opérations d'investissement sur le réseau routier national, le projet a donc été soumis à l'avis IGR/IGOA en amont de l'obtention d'une autorisation de construction accordée par l'État.

Contraintes majeures

Les contraintes majeures du projet ont été multiples. La Direction Interdépartementale Routes Ile De France (DIRIF) a imposé des contraintes d'exploitation routière pendant et après travaux (coupures RN186 et A86 exceptionnelles, neutralisation de voies existantes exceptionnelles...etc) dans le but de conserver une exploitation maximale des voies de la RN186 et A86, et aussi dans un souci d'assurer un niveau de sécurité optimal pour les usagers et les intervenants du chantier. L'Unité de lisibilité des équipements routiers (Dirif/ULER) a fixé des contraintes de visibilité routière pendant et après travaux (visibilité des portiques de signalisation, maintien de l'information directionnelle en temps réel). La Dirif a également précisé pour la maintenance future de l'ouvrage, que les coupures des voies routières seraient accordées dans le futur en nombre



très limité. L'ouvrage a été bien évidemment conçu pour assurer les fonctionnalités du tramway T7 et notamment la maintenance associée. Les emprises réduites des aires de chantier disponibles ont également été considérées pour la conception et le phasage de construction de l'ouvrage dans sa globalité.

Directives IGR/IGOA

En phase de conception, les ingénieurs généraux spécialisés ouvrages d'art (IGOA) et l'Ingénieur Général Route (IGR) ont donné des directives au Maître d'œuvre. Ainsi, l'IGR et l'IGOA ont insisté pour que le profil en long de l'ouvrage OA2 permette la maintenance future de l'ouvrage avec le moindre impact sur l'exploitation routière de la RN186 et A86 (coupures de circulations exceptionnelles et nocturnes) et le moindre impact sur la visibilité de la signalisation directionnelle (pas d'effet de masque de l'information routière positionnée sur des portiques situés en aval de l'ouvrage projeté).

4. ÉTUDES RÉALISÉES

Ces contraintes très importantes ont nécessité dans une première phase la réalisation et la combinaison de différentes études préliminaires (EP structurelle, étude de visibilité routière et étude de faisabilité de maintenance future) pour proposer une solution compatible avec toutes les contraintes imposées.

Trois études préliminaires indépendantes ont été menées en parallèle :

Étude de visibilité routière

Deux études indépendantes de visibilité ont été réalisées afin de déterminer précisément le profil en long de cet ouvrage, en vue de répondre aux contraintes concernant la visibilité des équipements routiers (panneaux sur portiques de signalisations).

Étude de faisabilité structurelle vis-à-vis du profil en long du tablier

Une étude de faisabilité structurelle a été réalisée afin de déterminer, compte tenu des contraintes connues (notamment portance sol et largeur disponible sur TPC pour réaliser les travaux), les solutions structurelles envisageables en fonction de différents niveaux de profil en long et leur coût.

Étude de Maintenance

Une étude de faisabilité de maintenance de l'ouvrage a été réalisée. Cette étude a fait l'objet d'un rapport présentant une analyse multicritères des avantages et inconvénients de plusieurs solutions pouvant répondre aux exigences de maintenance avec respects des contraintes imposées par l'IGR et l'IGOA, en particulier :

- Réalisation d'un ouvrage mixte acier-béton avec un profil en long permettant la mise en place de structure provisoire sous le tablier pour une remise en peinture ultérieure,
- Réalisation d'un ouvrage mixte hybride en acier Auto-patinable et en acier courant permettant de s'affranchir de la remise en peinture extérieure, ultérieure du tablier,
- Réalisation d'un ouvrage en acier inoxydable et en acier courant permettant de s'affranchir de la remise en peinture extérieure, ultérieure du tablier.

Cette étude a notamment démontré l'impact fort d'un ouvrage mixte qui aurait été construit en acier courant. Au niveau des caractéristiques géométriques de l'ensemble de l'ouvrage, cette option aurait conduit à une élévation importante du profil en long de l'ouvrage, à un allongement important (+33 ml par rapport au 112 ml construit) de la rampe d'accès à l'ouvrage de franchissement côté SOGARIS et à une élévation du mur de soutènement de la rampe Belle-Épine (hauteur maxi de 11 m au lieu d'une hauteur construite de 10 m). Au niveau exploitation routière, cet ouvrage aurait nécessité à chaque remise en peinture de la charpente métallique, tous les 30 ans environ, des coupures nocturnes des voies routières de l'A86 et de la RN186 très conséquentes en nombre et en coût.

Combinaisons des études de structure, de maintenance et de visibilité routière, analyse multicritères et proposition d'un ouvrage global

Une combinaison des différentes études préliminaires a été réalisée afin de proposer au MOA RATP, pour l'OA2, une solution réhabilitant un matériau (utilisation de l'acier auto-patinable) plus utilisé depuis quelques décennies en France. L'analyse multicritères a démontré l'intérêt économique et environnemental d'utiliser un tel acier (économie de coût global projet et maintenance future aisée avec un moindre impact environnemental sur une durée de vie de 100 ans).

Dossier POA

Après validation par le MOE RATP de l'ouvrage, un dossier Projet Ouvrages d'Art (POA) a été réalisé sur la base du programme arrêté. Il a ensuite été présenté aux différents services de l'État (avis IGR/IGOA) pour avis et validation finale.

5. SOLUTION RETENUE POUR LA STRUCTURE DU FRANCHISSEMENT A86/RN186

Caractéristiques principales du tablier

Les différentes contraintes du projet ont conduit à la réalisation d'un pont mixte. Les longueurs de franchissement (64 m de portée maximale) associées à un tracé en plan des voies du tramway avec une courbure prononcée (rayon de 241,714 m) ont amené SYSTRA à proposer une structure de type caisson mixte avec pièces de pont, ce type de struc-

ture étant bien approprié vis-à-vis des efforts de torsion liés à la courbure de la structure porteuse. En complément, les contraintes liées à l'exploitation de la RN186 et de l'A86, ont poussé SYSTRA à rechercher une conception limitant au maximum les interventions futures de maintenance de l'ouvrage. L'opération de maintenance la plus lourde et contraignante, liée à l'entretien d'un tablier mixte, correspond à la remise en peinture de la structure métallique du tablier. Ainsi, pour limiter ce type d'intervention, non acceptable par l'exploitant des voies franchies par l'ouvrage, la MOE a proposé la réalisation d'un pont mixte avec un caisson métallique « hybride » constitué, pour les tôles exposées (éléments au contact de l'air extérieur) d'un acier auto-patinable.

La hauteur totale du caisson réalisé, y compris béton structurel, est de 2.00 m, dont 1.75 m d'ossature métallique et 0.25 m de dalle béton.

La largeur du caisson est de 2900 mm.

Les épaisseurs structurelles des tôles du caisson métallique (hors épaisseur sacrificielle à la corrosion de 2 mm sur les âmes et sur la semelle inférieure du caisson) varient entre 24 et 75 mm pour les tôles supérieures, entre 35 et 98 mm pour les tôles inférieures et entre 16 et 30 mm pour les tôles d'âmes. L'espacement courant entre diaphragmes à l'axe du caisson est de 4 000 mm. Un cadre intermédiaire entre diaphragmes permet le bétonnage du hourdis sur coffrage perdu. Les diaphragmes courants sont constitués de PRS avec des semelles de largeur 300 mm, de hauteur variable entre 235 et 500 mm.

Le caisson métallique est constitué de tôles avec différents types d'acier :

- Âmes et semelles inférieures du caisson : S355K2W+N,
- Semelles supérieures du caisson : S355K2+N,
- Diaphragmes : S355K2+N,
- Raidisseurs des tôles inférieures et des tôles supérieures : S355K2+N,
- Raidisseurs d'âmes au droit des cadres intermédiaire : S355K2+N,
- Tôles extérieures d'habillage : S355K2W

Le poids de charpente mis en œuvre est de :

- Acier de nuance : S355W (405 tonnes)
- Acier de nuance : S355 (345 tonnes)

L'ouvrage a été mis en place par lançage. Le rayon en plan à l'axe du tablier au niveau de la tôle inférieure du caisson métallique a donc été réalisé avec un rayon constant ($R=241.714\text{ m}$) pour permettre un lançage complet du tablier au droit de la totalité de la brèche à franchir.

La jonction âmes / tôles d'habillage se situe à 10 cm environ du dessus de la semelle supérieure pour assurer le guidage de du tablier en cours de lançage.

6. DÉTAILS SPÉCIFIQUES RETENUS LIÉS À L'UTILISATION DE L'ACIER AUTOPATINABLE

La durabilité de l'acier auto-patinable peut se trouver amoindrie en présence de brouillard salin fréquent et d'un environnement confiné (effet tunnel).

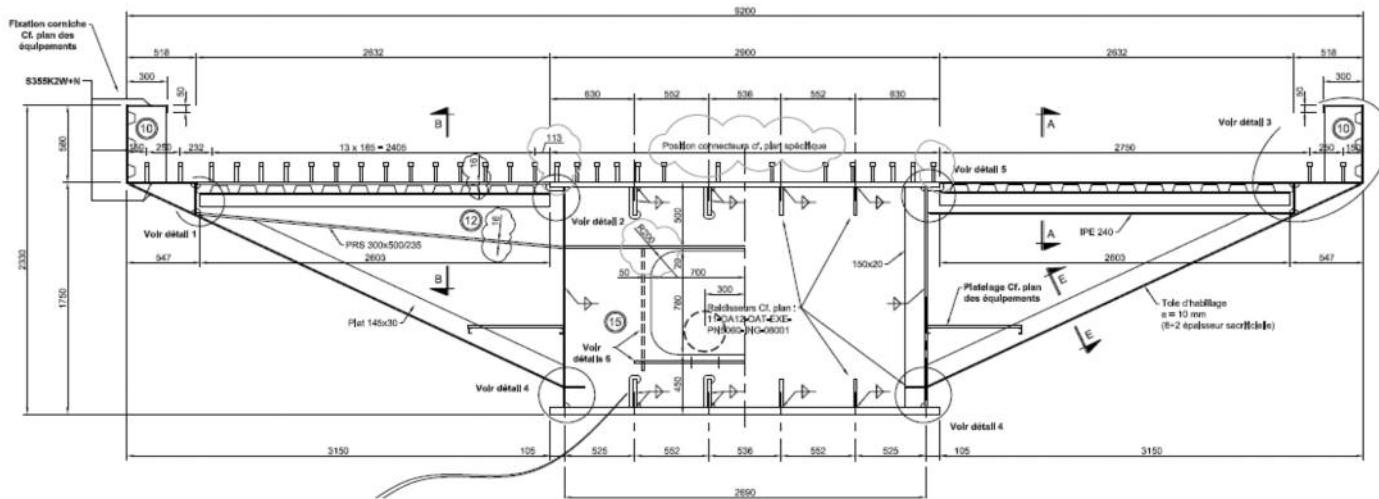
Ces conditions défavorables ne sont pas réunies dans le cadre du présent projet. En effet, l'ouvrage ne présente pas une largeur importante et se trouve à une hauteur élevée par rapport aux voies franchies : Au minimum la hauteur libre entre le niveau fini de la chaussée et le dessous du tablier est de 6.60 m environ (au droit chaussée de la RN186 direction Versailles). La hauteur libre au droit de l'A86 varie entre 7.00 m et 7.46 m (travée P1-P2). Les opérations de dessalage sont de plus peu fréquentes dans cette région.

Une épaisseur de tôle sacrificielle de 2 mm a été ajoutée pour les épaisseurs finales des tôles de fond, des tôles d'âmes du caisson ainsi que des tôles d'habillage.

Protection anti-corrosion sur certaines parties de l'ouvrage

a) Zones intérieures du tablier

Les parties intérieures (parties intérieures caissons latéraux et caisson central en acier autopatinable ou bien en acier de nuance S355K2+N) sont protégées et peintes avec un système de peinture type ACQPA C4 ANI 560. L'épaisseur



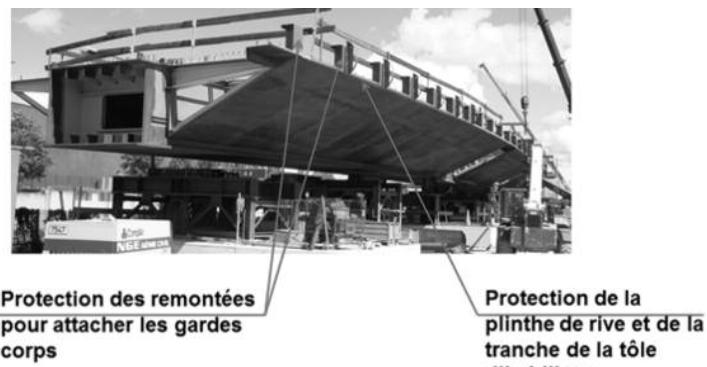
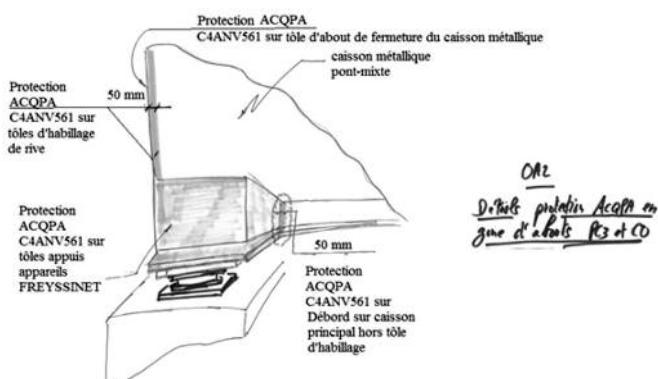
Demi Coupe sur diaphragme courant et demi coupe sur raidisseur intermédiaire (extrait DOE PONCIN).

totale du système est de 280 µm. La surface traitée représente environ 6.500 m². Le risque de condensation et le choix de la maîtrise d'ouvrage de ne pas installer d'équipements de déshumidification de l'air ont conduit à protéger les tôles intérieures avec un système ACQPA. Ainsi, les parties intérieures du caisson dont le confinement n'est pas favorable au cycle sécheresse-humidité ont été peintes en couleur claire pour faciliter les inspections futures.

b) Zones extérieures du tablier

Un système de protection ACQPA C4 ANV 561 (épaisseur total du système : 280 µm) a été appliqué sur les structures extérieures sensibles :

- Au droit des surfaces extérieures des tôles situées aux abords d'ouvrage compte tenu du fait que les culées sont souvent soumises à la présence d'eau et à des détritus en tout genre qui peuvent induire des zones de rétention d'humidité



• Au droit de zones sensibles vis-à-vis des problèmes de durabilité des aciers lorsqu'ils se trouvent dans des zones de géométrie complexe pouvant engendrer des phénomènes de corrosion non contrôlés :

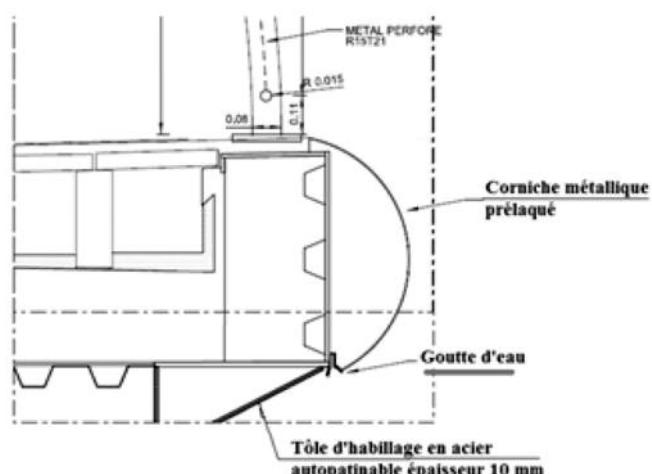
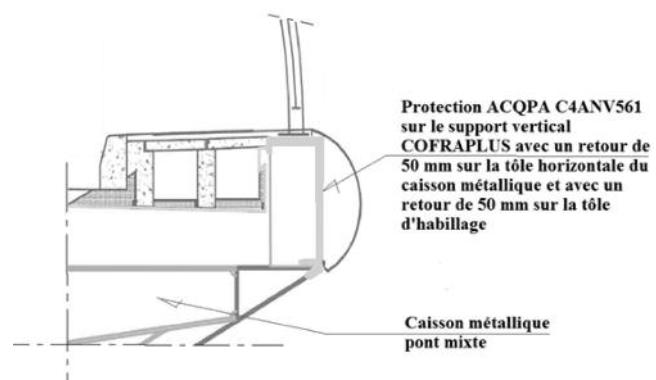
- Peinture sur remontées pour attache des gardes corps,
- Peinture sur plinthe de rive et tôle support métallique des garde-corps (voir figure ci-dessous).

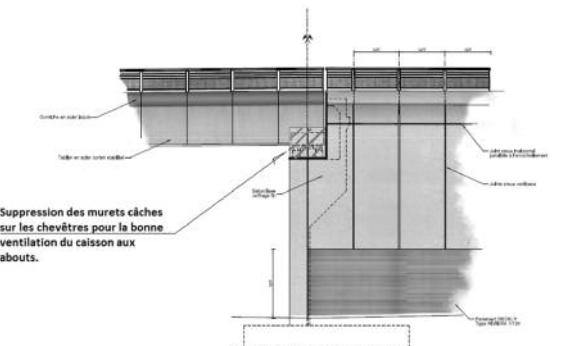
Corniches avec goutte d'eau et altimétrie spécifique

Par ailleurs, pour prévenir des éventuelles salissures de la chaussée routière liées à des coulures d'eaux pluviales qui se seraient chargées en dépôt de patine, les corniches de l'ouvrage sont équipées de larmiers disposés à une altimétrie inférieure au niveau d'accrochage des tôles de rive en acier autopatinable (voir figure ci-dessous, en bas).

Pas d'obstacles à l'écoulement de l'eau entre culées

Le caisson a été conçu de sorte à ce que toute rétention d'eau soit évitée le long de l'ouvrage. Aucun élément extérieur tels que des raidisseurs, ne vient entraver l'écoulement de l'eau sur la partie inférieure du caisson. Toute eau pluviale qui arrive au droit des tôles d'habillage et du débord de la tôle inférieure du caisson central chemine gravitairement jusqu'à la culée PC3.





DETAIL DE LA CULÉE C0



Ventilation des zones d'abouts au droit des culées

Afin d'obtenir une ventilation optimale du caisson métallique au droit des culées, les murets caches ont été supprimés en phase de conception et non réalisés (voir figure ci-dessus).

État « T0 » des tôles en acier S355W

Afin de suivre l'évolution des tôles en acier auto-patinable pendant la durée de vie de l'ouvrage, notamment l'évolution de l'épaisseur de la section résistante, un levé initial (état « T0 ») a été réalisé en octobre 2013 à l'intérieur du caisson central et des deux caissons latéraux. Les mesures ont été réalisées avec une jauge d'épaisseur de corrosion type Elcometer CG70 BDL ou équivalent, avec une précision au 1/100^e de mm. Cinq points ont été levés pour chaque « compartiment » de caissons entre pièces de pont (voir figure ci-dessous).

7. AVANTAGES DE LA SOLUTION RETENUE ET RETOUR D'EXPÉRIENCE

Les avantages de la solution retenue pour le tablier du franchissement A86/RN186 (pont mixte hybride avec un acier S355W) sont multiples.

Limitation de l'impact environnemental

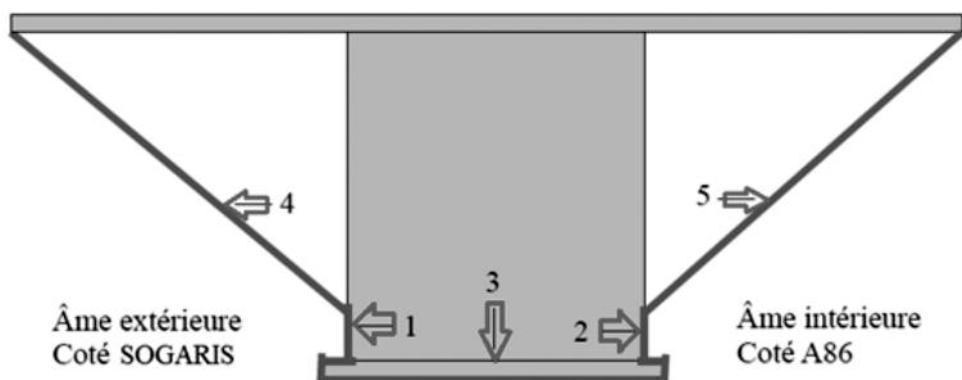
L'ouvrage construit permet une réduction d'utilisation de produits chimiques (source de pollution et de déchets industriels lors de la remises en peinture et du sablage de l'acier), une réduction d'emprise globale de l'ouvrage, une réduction forte des besoins en interceptions routières A86/RN186 pour la maintenance future.

Financier

L'ouvrage construit induit des coûts de maintenance réduits notamment en évitant des coûts importants d'interceptions routières (interventions Dirif). Les surcoûts de fourniture de l'acier S355W sont relativement faibles (environ 10 à 15 % de majoration du prix de fourniture) et seront amortis par les économies futures liées aux frais de maintenance réduits. Enfin, le coût global (réalisation ouvrage + maintenance du système de protection) de l'ouvrage construit est le moins onéreux en considérant le cycle de vie de 100 ans comparé à une solution mixte classique.

Assemblages de la charpente métallique

L'acier S355W n'a pas donné lieu à des difficultés particulières de réalisation. Pour les assemblages par soudures, les temps unitaires constatés pour l'exécution des soudures des assemblages de tôles S355W (au droit des joints de chantier notamment) étaient peu différents des temps unitaires pour



des assemblages d'épaisseur identique en tôle S355 classique. Pour les joints multi-passes, l'utilisation des matériaux d'apport ayant un comportement amélioré à la corrosion, similaire à celui du métal de base S355W a été limité aux passes formant la surface sur une profondeur légèrement supérieure à la provision d'épaisseur ($7 \text{ mm} > 2 \text{ mm}$ d'épaisseur : épaisseur prévisionnelle patine + marge).

Retour d'expérience

Depuis la fin des opérations de lançage du caisson métallique en septembre 2012, aucune coulure et trace de patine n'ont été constatées sur les appuis béton et sur la chaussée de la RN186 et de l'A86.

