



Gestion des Ouvrages d'Art Ferroviaires en Égypte *Proposition du comité éditorial*

GESTION DES OUVRAGES D'ART FERROVIAIRES EN ÉGYPTÉ

MANAGEMENT OF RAILWAY BRIDGES OF EGYPT

Hussein ABBAS & Maha M. HASSAN
EHAF Consulting Engineers, Cairo - Egypt
habbas@ehaf.com

INTRODUCTION

Dans ce rapport technique un nombre de ponts métalliques ferroviaires rivés seront examinés. Ces ouvrages d'art sont d'une moyenne portée qui varie entre 60 et 80 m, ils sont situés au dessus du fleuve Nil, la voie navigable la plus importante du pays. Les trois ponts datent du siècle dernier, le pont de Zifta fut construit en 1907, et le plus récent date de 1965, les ponts ont donc entre 108 et 60 ans d'âge. La procédure d'inspection envisagée pour ces anciens ouvrages, ainsi que la méthode mise en place sont décrites, par la suite un aperçu des dégradations observées sera présenté. Des essais non destructifs seront effectués ainsi que des chargements statiques et dynamiques seront appliqués. Enfin des vérifications théoriques et des modélisations par éléments finis seront développées afin de comparer leurs résultats avec les mesures expérimentales ainsi obtenues.

La mission complète confiée par ENR à EHAF comporte la révision de 75 ouvrages d'art métalliques. Elle fera l'objet, dans un premier temps d'une vérification complète du bon comportement de ces ouvrages sous les conditions actuelles d'exploitation et compte tenu du trafic futur. Ensuite les résultats de ces vérifications serviront à établir un programme d'inspection routinier en service. Un des buts de cette étude est d'initialiser une base de donnée ouvrage d'art à partir du diagnostic sur l'état des ouvrages inspectés, dans le but de l'entretien et le suivi régulier de ceux-ci suivant les conditions d'exploitation envisagées. La mise en œuvre d'une base de

données sur les pathologies affectant les ponts métalliques ainsi que sur les remèdes apportés est nécessaires voire indispensable. Les vérifications de tous les éléments de la structure ont été conduites suivant les règles Egyptiennes de calcul [1].

DESCRIPTION DES OUVRAGES

Trois ouvrages d'art seront considérés dans cette étude, à savoir: Zifta, Marazeek et Edfina. Les ouvrages retenus pour cette communication présentent quelques caractéristiques communes et des traits particuliers. A titre d'exemple les trois ponts sont en acier doux Thomas, un matériau d'une excellente ductilité, très répandu pour les ouvrages métalliques construits à partir des années 1900. Notons aussi que le tracé des trois ponts est parfaitement rectiligne. Deux des trois ponts sont calculés comme une suite de travées isostatiques pour permettre un changement rapide des travées défectueuses et/ou défaillantes. Le concept des travées isostatiques est un concept simple basé sur l'indépendance des travées (figures 1, 2 et 3). Le pont de Zifta a été mis en service en 1907, un ouvrage centenaire par excellence, d'une longueur totale de 420 m, composé de 5 travées isostatiques fixes identiques de 70 m chacune et une travée mobile de la même portée, du type tournant, car le gabarit au dessus de l'eau n'est que de 1 m. L'entreaxe des poutres latérales est de 8,808 m, et d'une hauteur variable allant de 6,56 m au centre à 3,25 m aux appuis. Les pièces de pont sont espacées tous les 5,30 m. Le pont supporte une voie



Figure 1 : Pont de Zifta (1930).



Figure 2 : Pont de Marazeeq (1959).



Figure 3 : Pont d'Edfina (1907).

ferrée et une chaussée pour circulation routière d'une largeur 3,60 m, ainsi que 2 trottoirs d'environ 2,8 m chacun.

Le plus récent de ces trois ponts, le pont de Marazeeq, date de 1959, il est d'une longueur totale de 810 m, décomposé en 9 travées toutes fixes et identiques de 90 m chacune. L'entreaxe des deux poutres principales est de 12,50 m, et d'une hauteur constante de 11 m. Les pièces de pont sont espacées de 9 m. Il est dépourvu d'une travée mobile car il offre un passage libre d'un gabarit de 14.6 m pour les bateaux ce qui est relativement suffisant pour le fonctionnement du trafic maritime. Il comprend une seule voie ferrée et une chaussée pour les voitures de 6 m ainsi que deux trottoirs de 1,50 m de largeur pour les piétons placés en encorbellement et complètement isolés de la circulation routière (figures 4-a, 4-b, 4-c, 5-a, 5-b, 6-a et 6-b).

Le pont d'Edfina est d'une longueur totale de 293 m, construit en 1930, il est composé de 3 travées isostatiques identiques et fixes de 80,5 m de portée et une travée mobile de 53,30 m du type tournant compte tenu du manque du gabarit qui n'est

que de 0,8 m au dessus des plus hautes eaux navigables. Le profil en travers de ce pont-rails comprend une voie ferrée et deux chaussées de largeur 4,0 m chacune, placées en encorbellement et deux petits passages pour piétons. L'entreaxe des poutres latérales est de 5,3 m, et la hauteur de la poutre latérale en partie centrale est de 12 m, ce qui donne un rapport (h/L) hauteur/portée de 1/6,7. Quant aux pièces de pont elles sont espacées tous les 8 m.

Du point de vue système statique, les trois ponts sont composés de deux poutres latérales parallèles à treillis type Warren ou Pratt munies d'un système de contreventement supérieur. Le tablier à pose de voie directe est constitué de longerons et des pièces de pont entièrement assemblés par rivets aux deux poutres latérales. Les poutres latérales sont soit continues sur trois travées pour le cas du pont de Marazeeq, soit simplement appuyées pour les deux autres ponts. Les rapports (h/L) hauteur/portée des poutres latérales se situent entre 1/6,7 à 1/8,1 pour les ponts Edfina et Marazeeq respectivement, et 1/7,3 pour le pont de Zifta. Ces rapports sont situés dans des

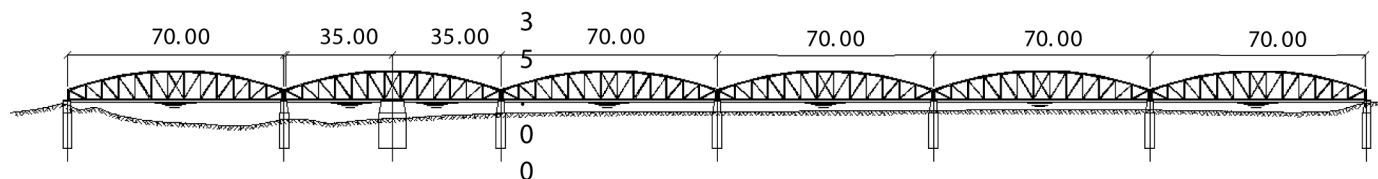


Figure 4-a : Elévation et coupe longitudinale du pont-rails de Zifta.



Figure 4-b : Plaque d'inauguration du pont en 1907.



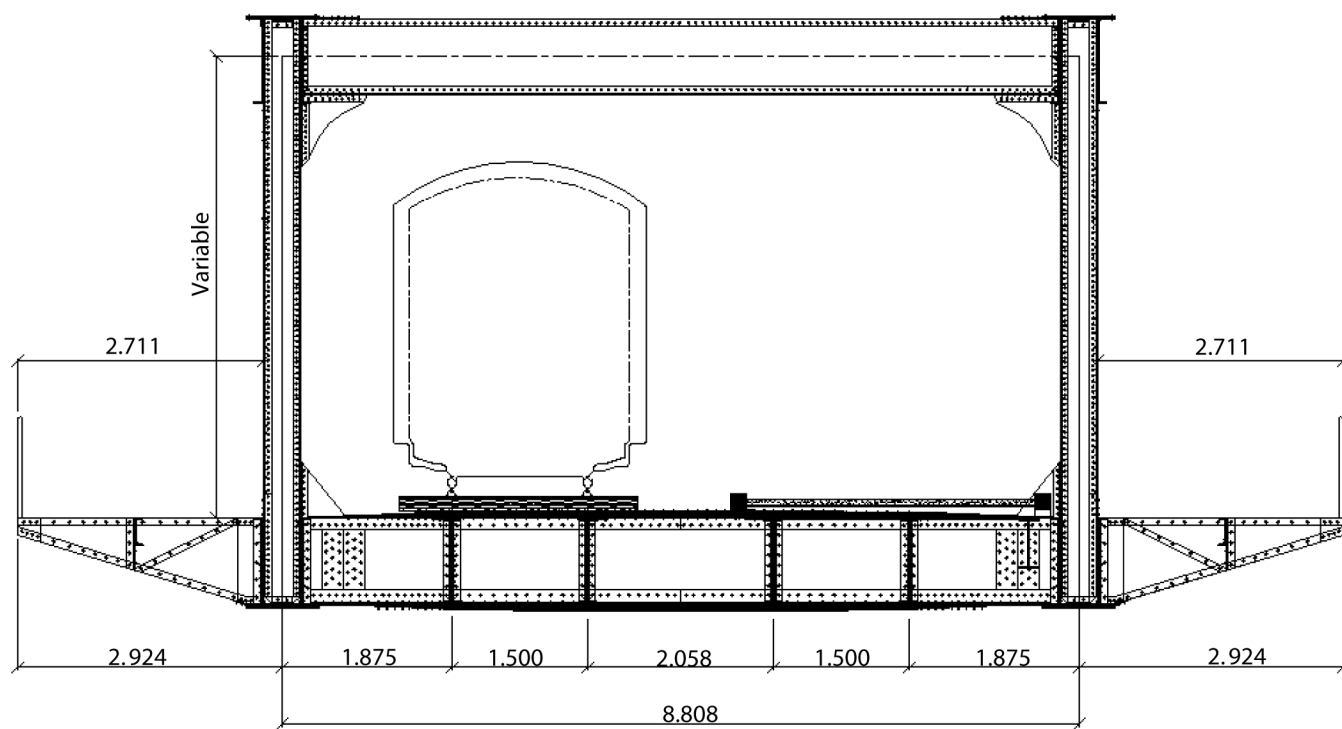


Figure 4-c : Coupe transversale du pont-rails de Zifta.

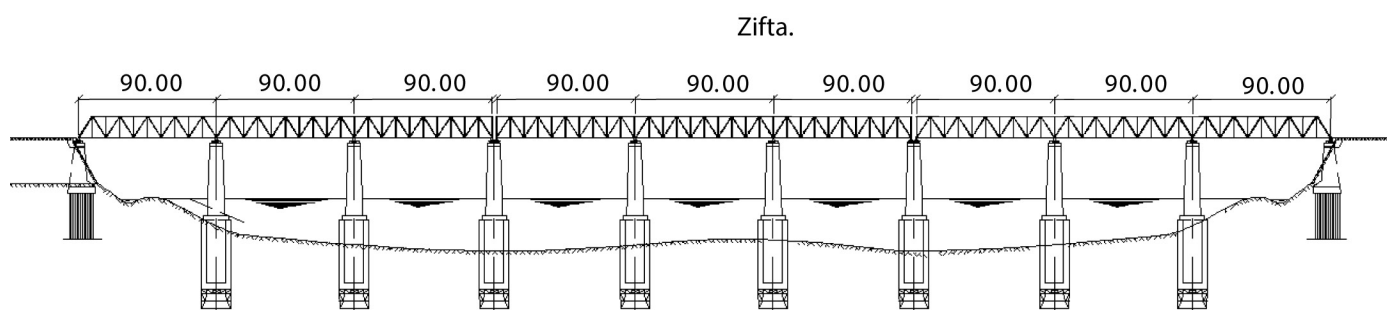


Figure 5-a : Elévation et coupe longitudinale du pont-rails de Marazeek.



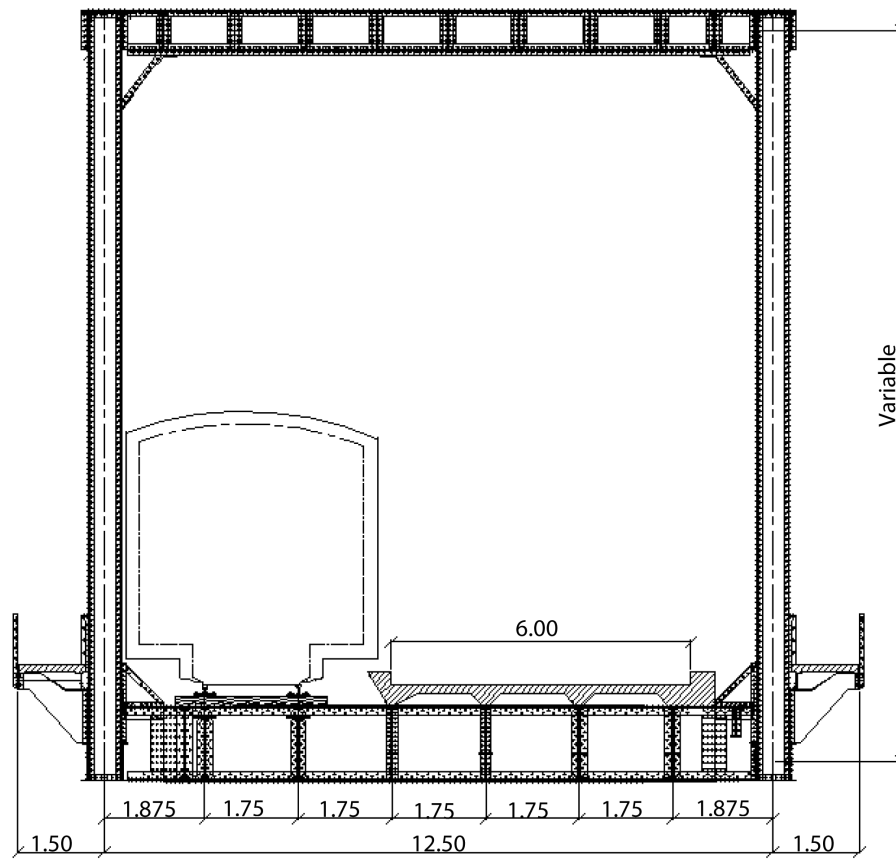


Figure 5-b : Coupe transversale du pont-rails de Marazeek.

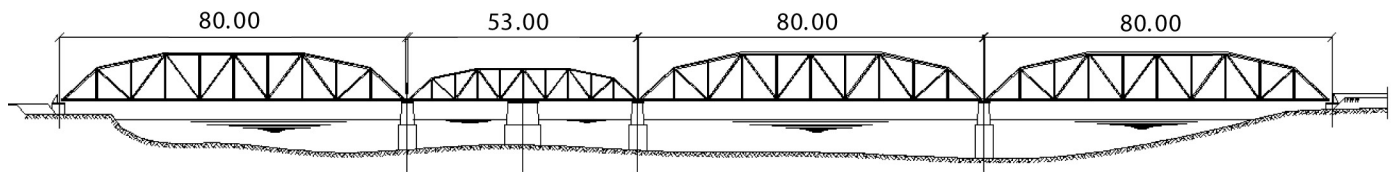


Figure 6-a : Elévation et coupe longitudinale du pont-rails d'Edfina.



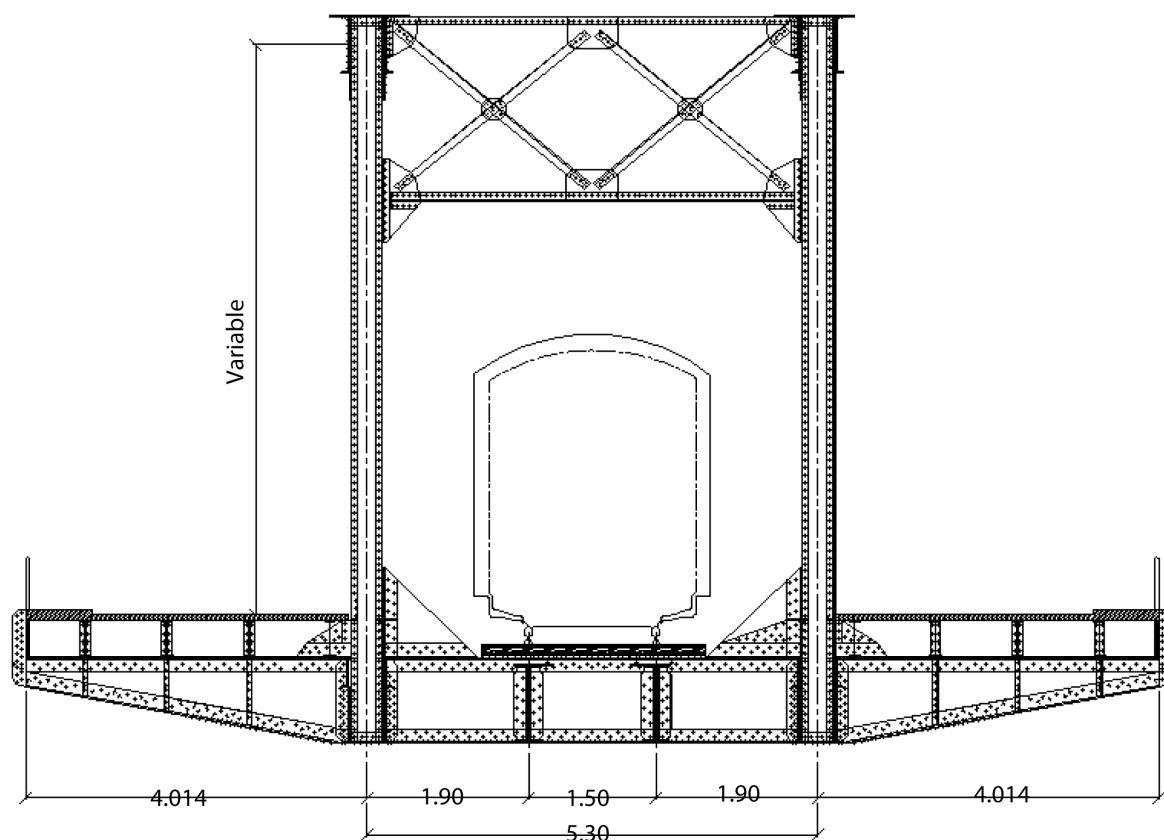


Figure 6-b : Coupe transversale du pont-rails d'Edfina.

limites acceptables à même de donner des déplacements verticaux des poutres latérales réglementaires. La conception de ces ponts est tout à fait conforme aux connaissances et aux pratiques du début du siècle dernier.

TRAVÉES MOBILES DES OUVRAGES

La configuration des travées mobiles des deux ponts est du type tournant symétrique, reposant sur une pile centrale et soumis à un trafic routier et ferroviaire dans le cas fermé. La

situation de ces travées en manœuvre et en service est donc bien déterminée. La largeur du pertuis à franchir n'excédant pas 30 m. A noter que les travées mobiles sont en raison de leurs manœuvres beaucoup plus sujettes à l'apparition de phénomène de fatigue que les travées fixes. Les travées mobiles du type tournant sont en treillis d'une hauteur 6,5 m et 8,0 m, pour les ponts Zifta et Edfina respectivement. La commande de rotation du tablier est obtenue par un dispositif hydraulique et manuel en cas de nécessité (figures 7 et 8).

La rénovation et l'amélioration de ces ponts demeurent une tâche essentielle compte tenu du fait que certains de ces ponts



Figure 7 : Positionnement de la travée tournante du pont de Zifta.

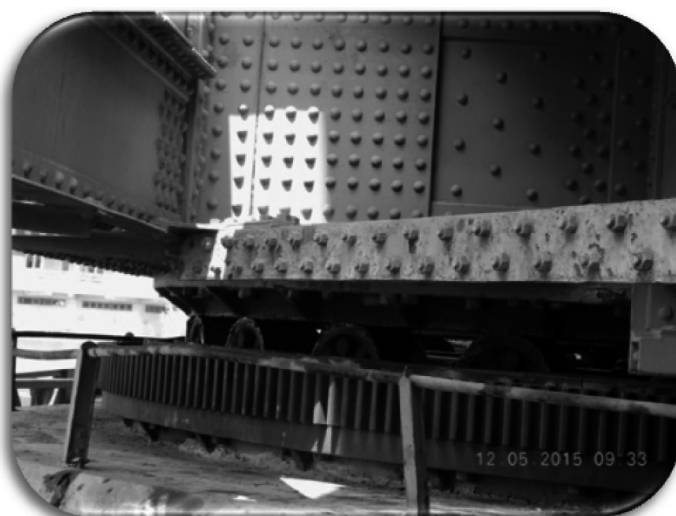


Figure 8 : Le pivot de la travée mobile du pont d'Edfina.



ne fonctionnent plus depuis de longues années. La rénovation comprend l'ajout d'une cabine de commande, une armoire d'appareillage électrique et la peinture et la patine. A noter que le pont mobile El Ferdan qui enjambe le canal de Suez près d'Ismaïlia, est le plus important dans cette catégorie, il fait 640 m de longueur totale en trois travées (150+340+150 m). Les deux travées mobiles ont été soumises à une inspection détaillée qui comprend les pivots, les chaînes, les câbles, les rails, le système de graissage et de lubrification ainsi que l'état des moteurs. Il s'agit, bien entendu, de relever tous les défauts apparents, sans démontage ou destruction des parties de l'ouvrage existant ni de son mécanisme.

DÉSORDRES ET DÉGRASATIONS CONSTATÉES

Les principales déficiences rencontrées suite à cette campagne exhaustive d'inspection seront présentées et commentées. En effet, les dégradations constatées sont catégorisées en 4 groupes, à savoir :

- Désordres des éléments structuraux
- Désordres des parties sous tablier et fondations et défauts d'étanchéité
- Désordres des attaches des rails et traverses
- Désordres des éléments non structuraux (figures 9, 10 et 11).

Le groupe (a) engendre des détériorations dues à la corrosion, des fissurations par fatigue du métal soumis à des cycles de contraintes dynamiques, des assemblages à rivets perdus, des ovalisations exagérées des trous, des appareils d'appui descellés, des effets de chocs dus au déraillement des trains en excès de vitesse ou à l'impact direct externe des véhicules et des vibrations excessives. Quant au groupe (b) nous remarquons des fissures et fractures horizontales et verticales des culées et des piles, des aciers apparents, des dégradations avancées des dalles en béton. Le groupe (c) présente des attaches perdues rails-traverses, des traverses en bois pourri et fracturé, un serrage inefficace des rails Vignole. Le groupe (d) concernant les éléments non structuraux, comprend la dalle et les équipements du tablier, les désordres du revêtement inexistant ou détérioré des chaussées et trottoirs, ruissellement des eaux, manque d'éclairage nocturne de l'ouvrage.

Aucune solution standardisée ne sera prescrite. Chaque cas de dégradation sera traité à part avec toutes les règles de l'art.

Il conviendrait de prendre en compte tous les désordres dont peut souffrir l'ouvrage liés aux quatre groupes ci-haut cités compte tenu du type de la structure du pont, son degré de sollicitation par le trafic et son âge.

COMMENTAIRES

L'inspection de ces ouvrages a nécessité la visite des parties internes de l'ouvrage. Des échelles, échelons, escaliers et des marches ont été utilisés pour cette circulation et y arriver aux zones difficiles d'accès. L'aide des plongeurs a été sollicitée pour ausculter les parties submergées de l'ouvrage. Notons aussi que les plans d'archives mis à notre disposition n'étaient pas dans beaucoup de cas conformes à l'exécution, ce qui a nécessité un effort supplémentaire et des relevés géométriques indispensables pour conduire notre mission à terme. L'ENR adopte des solutions et des conceptions des ouvrages métalliques des tabliers à poutres latérales triangulées. Un tel choix nous paraît justifié notamment pour les ponts-rails de moins de 100 m de portée.

Les principales déficiences rencontrées dans les tabliers métalliques des trois ponts occultés sont dues à la corrosion et aux détériorations produites par les charges roulantes, notamment la fatigue du métal. La corrosion ou oxydation du métal résulte de l'attaque par atmosphère humide ou par infiltration de l'humidité entre les pièces mal plaquées entre elles. En conséquence, des réductions d'épaisseur ou une augmentation de volume importante sont visibles. Le phénomène de fatigue provoque aussi des fissurations généralement dans les zones tendues où il y a une forte concentration de contraintes ou une variation brusque de section et effet d'entraille [2].

Le mode d'assemblage des attaches de ces ouvrages est uniquement par rivets qui fonctionnent par cisaillement. Quant aux boulons HR, ils transmettent leurs efforts par frottement. Il est donc illusoire de vouloir associer deux de ces moyens pour transmettre un même effort. Remplacer un rivet par un boulon HR n'apporte quasiment rien à la résistance d'un assemblage ; le seul mérite d'une telle pratique est d'empêcher la corrosion de se développer au droit du trou [13] (figures 12 et 13).

Les analyses statiques ont été conduites dans un premier temps, sur un modèle bidimensionnel de l'ouvrage. Par la suite, il est apparu nécessaire de procéder à une modélisation plus précise en 3-D.



Figure 9 : Corrosion sévère d'une attache.



Figure 10 : Etanchéité inefficace sous dalle.



Figure 11 : Traverse en bois fracturé et des attaches perdues.

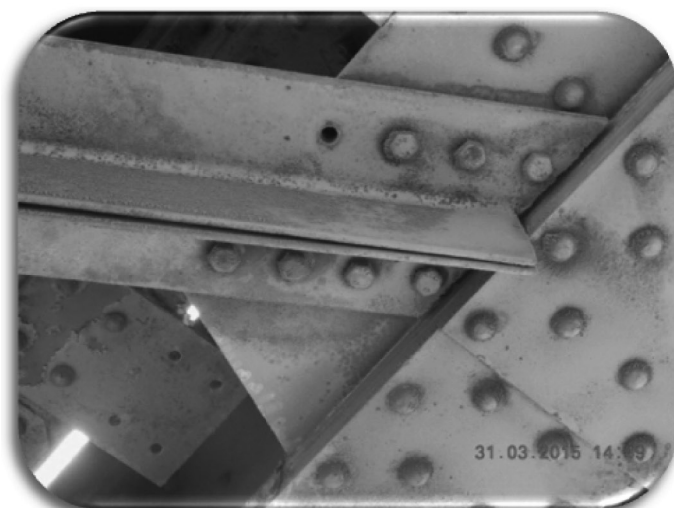


Figure 12 : Trou d'un rivet à remplacer.



Figure 13 : Remplacement des rivets par des boulons.

FONDACTIONS EN MILIEU AQUATIQUE

Les piles des travées enjambant le fleuve sont pour une bonne partie des massifs en béton de chaux coulé. Les fondations sous l'eau, sont des pieux battus ou des caissons sans fond. L'inspection des parties immergées des ouvrages a été faite par des plongeurs spécialisés.

Le confortement des fondations anciennes en site aquatique est vital afin d'assurer la pérennité et la sécurité des ouvrages. En effet, ces fondations sont sujettes à de nombreux facteurs entraînant le vieillissement, et risquent de mener à terme à la ruine (figures 14 et 15).

Il convient toutefois de signaler que l'abaissement des lignes d'eau du Nil survenu suite à la construction du haut barrage d'Assouan, a entraîné le pourrissement des divers éléments ainsi exposés à l'air. L'étude de l'évolution du cours d'eau au voisinage des fondations et des piles des ouvrages en milieu aquatique s'avère donc indispensable.

LECTURE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Nous pouvons retenir de ce rapport que les causes et la nature des désordres sont les suivantes :

L'inventaire et l'inspection périodique des ouvrages d'art sont en retard sur les besoins. La connaissance du comportement et les conditions actuelles de ces anciens ouvrages est nécessaire voire fortement recommandée.

La corrosion est de loin la principale cause de détérioration voire même la ruine de ces anciens ponts métalliques. L'endommagement par fatigue dû à l'application des cycles d'efforts d'un très grand nombre de répétitions, ce qui peut conduire à la rupture des pièces de l'ouvrage d'une manière progressive étalée sur le temps ou brutale. La modélisation probabiliste des fissures de fatigue d'éléments et d'assemblages est indispensable pour les structures métalliques compte tenu du vieillissement de ces ouvrages d'art gérés par l'ENR.



Figure 14 : Plongeur en action.



Figure 15 : Accès par bateau.



Figure 16 : Amorce d'une rupture à la fatigue d'une attache longeron/pièce de pont.

Le béton du tablier présente, d'une manière générale, des dégradations relativement avancées du béton, cela en outre de celles initiales liées à une qualité moindre d'exécution d'antan. D'assez nombreux défauts de parements du béton par ségrégation, de perte de laitance, coffrages défectueux, inclusions diverses (pièces des bois, etc.), reprises de bétonnage peu soignées, etc., avec le temps sont observés. Les parements ont aussi pris un aspect très délavé et poreux avec de fréquentes efflorescences blanchâtres de calcite voire formation de stalactites humides. Des éclatements ainsi que des effritements des surfaces sont nombreux. Les éclatements du béton résultent aussi de la corrosion des armatures, la perte de section des armatures dénudées est parfois notable [2]. Toutefois, l'état de cet élément non structurel de la structure n'affecte en rien ni la stabilité ni le comportement global du pont (figure 16).

Les dalles et les couvertures en béton qui équipent les trottoirs et les chaussées manquent généralement d'une chape efficace d'étanchéité d'où des infiltrations d'eau entraînant la corrosion des pièces métalliques en contact avec les dalles. Il faut aussi empêcher les accumulations de poussières et de débris qui retiennent l'humidité et favorisent la corrosion de l'acier. Les travaux de peinture et la remise en état suite au traitement des surfaces au jet d'abrasif est essentiel. Suite à cette intervention, une deuxième inspection s'avère nécessaire afin de localiser les micro fissures non identifiées lors de la première inspection et vue la quantité et la densité d'oxydation. L'attache des pièces de pont avec les treillis principales est systématiquement calculée comme une travée isostatique, or les essais ont démontré que cette attache est partiellement fixe, et que son degré de fixation varie entre 10 et 35% [4]. Cette fixation imprévue provoque l'apparition de moments de flexion qui sollicitent les têtes de rivets à l'arrachement. Notons d'autre part que le remplacement des rivets corrodés travaillant au cisaillement est indispensable. Quant aux rivets travaillant en traction, donc à l'arrachement, la corrosion des têtes devient un dommage à réparer pas nécessairement à remplacer. Ajoutons à cela que la bonne tenue des pièces secon-

dares du tablier (longerons et pièces de pont), s'explique par l'usage des méthodes de calcul simples mais conservatives qui négligeaient les effets hyperstatiques favorables à la résistance. En conclusion, il est admis de remplacer les rivets par des boulons, sous réserve que les rivets subsistants soient seuls, capables de reprendre l'effort appliqué [5].

Le trop grand entraxe des rivets permet à l'humidité de pénétrer entre deux tôles et de développer de la corrosion due aux pièges à eau ainsi obtenus, d'entretien quasiment impossible. Les joints des ponts-rails et de leurs appareils d'appui négligés laissent l'eau ruisseler sur la charpente métallique. La corrosion et aussi l'accumulation de sable entre les balanciers des appareils d'appui fixes conçus pour permettre des rotations et empêcher les déplacements entravent donc leur bon fonctionnement. Le seuil entre l'ouvrage et ses accès bétonnés ainsi que les joints ont montré des signes de faiblesse. Les tassements du remblai des culées à l'approche de l'ouvrage ont créé des ouvertures, ce qui aurait certainement comme conséquences de majorer les efforts dynamiques d'une grande ampleur non prévus par le concepteur de l'ouvrage.

Les épreuves dynamiques qui ont fait suite aux épreuves statiques avaient pour objectif de restituer les principaux modes de vibration de l'ouvrage. Les épreuves ont eu lieu les nuits et les jours fériés. Les mesures et les analyses effectuées sont actuellement en cours de traitement.

CONCLUSIONS

La présente communication dresse l'état des lieux tel qu'il ressort lors de nos visites de la première tranche d'ouvrages. ENR doit consentir un effort considérable de rattrapage pour assurer la pérennité de son parc d'ouvrages d'art, et plus particulièrement des ouvrages métalliques et des fondations en site aquatique. Cette opération d'auscultation débouchera sur une estimation des coûts d'entretien. Elle permet aussi de sensibiliser les connaissances techniques des personnels chargés de l'entre-





tien de la surveillance des ouvrages. Les instruments permettant d'atteindre cet objectif sont la systématique des inspections.

REMARQUE FINALE

Le pont de Zifta construit en 1907 est un pont unique de son genre. Il est à ce jour parfaitement opérationnel et fonctionnel. Je propose vue sa valeur culturelle exceptionnelle, que le gouvernement dépose un dossier pour son inscription au patrimoine de l'UNESCO, à l'instar des ponts ferroviaires en Inde de Nilgiri qui fut achevé en 1908 et le pont de Darjeeling Himalaya Railway et le pont de Pamban.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à exprimer ici leurs remerciements à toutes les personnes qui leur ont permis de disposer des infor-

mations sur les inspections, les essais et les mesures relevées des ouvrages cités dans cette communication. La réussite n'a été possible que par l'excellente collaboration de tous les participants.

RÉFÉRENCES

- "Egyptian Code for Practice for Steel Construction and Bridges (ASD)", Arab Republic of Egypt, Ministry of Housing, Utilities and Communities. 2001.
- "Gestion des Ouvrages d'Art", Actes du Colloque Organisé par ENPC, Paris, Octobre 1994.
- "Maintenance et Réparation des Ponts", Jean-Armand Calgaro & Roger Lacroix, Presse ENPC, 1997.
- "Static and Dynamic Testing of Through-Truss Bridge", AAR Technical Center, Chicago, Illinois, 1992.
- "Development of System Reliability Models for Railway Bridges", University of Nebraska-Lincoln, 2012.

NDLR : Les figures 1, 2, 3, 5-a, 6-a et 7 sont illustrées en couleur en première de couverture
