

# résumés — abstracts

## **ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET À DE NOUVEAUX USAGES**

### **PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS ET ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES-DELTAS**

Ir. P.T.M. DIRCKE, Ing. R.H. DOLFSMA

Les villes situées dans des deltas doivent faire face à la conjugaison de plusieurs phénomènes qui mettent en danger leur existence même : montée des eaux due au réchauffement climatique, augmentation des risques de tempêtes et d'ouragans, affaissement du sous-sol, accroissement des populations. Pour faire face à cette situation, des actions très importantes d'aménagement urbain et de protection devront être entreprises dans les décennies à venir.

Le réseau « Connecting Delta Cities » regroupe sous la houlette de Rotterdam les grandes agglomérations concernées à travers le Monde, et constitue un forum d'échange de connaissances et d'expériences.

### **FLOOD PROTECTION AND CLIMATE ADAPTATION IN DELTA CITIES**

*Cities located in deltas are facing the combination of phenomenon endangering their future : waters raising due to global warming, increased hurricane and storms risks, soil subsidence and increasing population. To face this situation, large urban planning action and protection works will be needed shortly.*

*“Connecting Delta Cities”, a network of such large cities across the World, was created under the leadership of the city of Rotterdam, to exchange knowledge and share experience.*

## **ÉTUDE DE LA CONCEPTION DES PONTS MIXTES ACIER-BÉTON DANS LE CADRE D'UNE ANALYSE DE CYCLE DE VIE – SYNTHÈSE DU PROJET SBRI**

André ORCESI, Ngoc-Binh TA, Yannick TARDIVEL, Noël ROBERT, Nicolas HENRY, Christian CREMONA, Damien CHAMPENOY

Lancé en 2009 et achevé en juin 2012, le projet européen SBRI propose une évaluation globale de la conception d'ouvrages d'art mixtes acier-béton selon des critères environnementaux, économiques et performantiels. Ce projet, financé par le Fond Européen de Recherche sur le Charbon et l'Acier, considère l'ensemble du cycle de vie des structures, depuis leur construction jusqu'à leur fin de vie, afin de fournir des résultats dans une perspective de développement durable. Les outils d'évaluation mis au point reposent sur une large base de données en lien avec la construction et la gestion des ouvrages et proposent plusieurs scénarios de stratégies de maintenance sur le cycle de vie des structures. Divers cas d'étude sont considérés (incluant différents types d'ouvrages autoroutiers, passages inférieurs ou supérieurs, sur une large gamme de portées) pour illustrer les notions d'analyse de cycle de vie. L'approche combinant une analyse de la performance des ouvrages, des coûts

de cycles de vie, et de l'impact environnemental induit par la gestion des ouvrages permet d'élaborer des recommandations pour les concepteurs et les gestionnaires d'ouvrages. Les méthodologies développées permettent finalement d'optimiser le choix de solutions de conception.

### **LIFE-CYCLE ANALYSIS OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE BRIDGE CONSTRUCTION - CONCLUSIONS OF THE SBRI PROJECT**

*Launched in 2009 and ended in June 2012, the European project SBRI proposes a holistic approach applied to steel-composite bridges by combining analyses of life-cycle assessment, life-cycle cost and life-cycle performance. This project, carried out with a financial grant of the research program of the Research Fund for Coal and Steel, considers an entire lifespan from the construction to the demolition of a bridge, under the perspective of sustainability. A valuable collection of data for bridge construction and management is obtained and a life-cycle scenario is described including maintenance strategies. A comparison by case studies (including medium and long span motorway bridges and crossings of motorways) is proposed to illustrate the concepts of life-cycle analysis. Combining LCA, LCC and LCP in a holistic approach leads to recommendations for bridge evaluation by designers and authorities. The proposed framework finally enables to optimize the choice of the design solution by considering economic, environmental, and performance constraints.*

## **DIAGNOSTIC, SURVEILLANCE ET RENFORCEMENT DES STRUCTURES**

### **DIX ANNÉES DE MONITORING STRUCTUREL DU VIADUC DE MILLAU**

Sylvestre GALLICE, Hervé LANÇON,  
Claude SERVANT

Le système de suivi et d'instrumentation du viaduc de Millau a été conçu par une équipe d'experts déjà impliqués dans les études de la structure de l'ouvrage. Avec le maître d'ouvrage, ils ont fixé des objectifs et des priorités. La gestion des données ainsi que la surveillance et la maintenance du système ont également été étudiées. Après avoir décrit le programme de suivi, les résultats des premières années d'exploitation de l'ouvrage sont présentés. Il y a lieu de rappeler que les enregistrements et le traitement des mesures pour les différentes phases de la construction et pour les opérations de réception de l'ouvrage ont déjà fait l'objet de deux articles dans le N° 868 de janvier 2010 de TRAVAUX.

### **TEN YEARS OF STRUCTURAL MONITORING OF MILLAU VIADUCT**

*The Millau viaduct monitoring and instrumentation system was designed by a team of experts already involved in structural engineering of the bridge. With the client, they set objectives and priorities. Data management and system monitoring and maintenance were also examined. After describing the monitoring program, the results are presented for the first few years' operation of the structure. As a reminder, measurement recording and processing for the various construction phases*

*and for the bridge acceptance operations has already been dealt with in two articles in issue No. 868 of TRAVAUX in January 2010.*

## **ORTHODALLE : UN PROCÉDÉ INNOVANT DE RENFORCEMENT DE TABLIER À DALLE ORTHOTROPE - L'EXEMPLE DU PONT D'ILLZACH**

Z. HAJAR, M. NOVARIN, C. SERVANT,  
E. LUANGKHOT, G. GÉNÉREUX, D. CHAMPENOY,  
D. PRYBYLA, D. BITAR, S. FYON, B. HAASMAN

La solution technique pour le projet de réparation du pont de la RD201 sur le canal de Huningue à Illzach est issue du programme de recherche ORTHOPLUS (Projet ANR).

L'objectif principal du projet de recherche ORTHOPLUS piloté par le SETRA était de mettre au point les outils théoriques et méthodologiques de prise en compte de l'épaisseur et de la nature du revêtement dans le calcul en fatigue d'un tablier métallique à dalle orthotrope. Ces outils ont ainsi été utilisés dans un second temps pour optimiser les revêtements bitumineux épais existants et pour développer une solution innovante de revêtement mince en béton fibré à ultra-hautes performances (procédé ORTHODALLE).

Ce procédé, déclaré lauréat de la Charte Innovation Routière 2010, a été expérimenté sur un ouvrage en service, à Illzach près de Mulhouse. Le tablier de cet ouvrage est constitué de poutres latérales de type WARREN de 106 mètres de longueur encadrant un platelage de type orthotrope. Les dégradations constatées portaient essentiellement sur le platelage à la jonction auget-pièce de pont alors que les poutres porteuses principales étaient en bon état de conservation. De ce fait, la solution de réparation la plus appropriée consiste à accroître fortement la rigidité du platelage supérieur en lui connectant une dalle mince en BFUP. L'inertie étant sensiblement accrue, les efforts de flexion longitudinale sont filtrés par le revêtement en BFUP et les contraintes à la jonction auget-pièce de pont sont ainsi notablement réduites. Cette solution a été appliquée en combinant la préfabrication et le clavage en place des éléments préfabriqués. La mise en œuvre de ce nouveau procédé est accompagnée d'une instrumentation fine du tablier, de façon à s'assurer du bon comportement dans le temps de l'ouvrage réparé sous circulation routière.

Le procédé ORTHODALLE, expérimenté avec succès sur le pont d'Illzach au cours de l'été 2011, a reçu le Label IVOR (Innovation Validée sur Ouvrage de Référence), attribué par le comité d'Orientation du Réseau Génie Civil & Urbain lors de la séance du 4 Juin 2012.

## **ORTHODALLE : AN INNOVATIVE SOLUTION FOR STRENGTHENING ORTHOTROPIC DECKS USING UHPFRC - THE ILLZACH BRIDGE**

*The technical solution (Orthodalle process) for the repair of the bridge on the local road RD201 over the Huningue canal in Illzach, near Mulhouse, Eastern France, was derived from the Orthoplus research program initiated in November 2006 by the French national research agency. The main objective of the Orthoplus research project coordinated by Sétra (French Highways Technical Agency) was to develop theoretical and methodological resources for taking account of the thickness and type of the road overlay when calculating the fatigue strength of a steel bridge with an orthotropic deck. These resources were then used to develop an innovative thin wearing course made with Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC).*

*The Orthodalle process uses the strength and durability properties of UHPFRC to extend the service lifetime of existing orthotropic slabs or more generally steel-frame structure. Declared the winner of the 2010 Road Innovation charter award, this innovative solution was experimented by Eiffage TP on Illzach Bridge, whose orthotropic deck showed major disorders. The repair solution involved local stiffening of the deck by rigidly connecting it to a thin slab made in BSI®, the UHPFRC developed by Eiffage TP, this slab being mostly composed of precast elements connected by cast-in place BSI® keying.*

*This paper presents the design, implementation and monitoring of this innovative repair, after more than one year of operation and associated follow-up investigations.*

## **LE DIAGNOSTIC D'OUVRAGES PORTUAIRES ANCIENS UN OUTIL D'AIDE À LA GESTION**

Bertrand COLLIN, Frédéric CAPPELAERE

Les gestionnaires d'ouvrages portuaires anciens doivent faire face à plusieurs problèmes : vieillissement des structures, risques environnementaux, maintien du niveau de service, adaptation des structures à de nouveaux équipements portuaires et à de nouveaux navires. L'évaluation de l'état et du comportement des structures est donc un élément essentiel d'aide à la décision quant aux choix stratégiques, techniques et économiques à opérer pour assurer la continuité de l'exploitation.

Cette évaluation passe par la réalisation d'un diagnostic qui doit fournir à l'exploitant les éléments objectifs lui permettant d'opérer ces choix.

La présentation de deux études représentatives réalisées sur deux ouvrages anciens – un quai céréalier à La Rochelle et un appontement pétrolier à la Guadeloupe – permet d'illustrer la démarche du diagnostic à partir de deux exemples concrets. Dans chacun de ces deux exemples, la problématique du gestionnaire est exposée, et les moyens et méthodes utilisés pour y répondre sont présentés.

Les conclusions issues de ces études de diagnostics sont ensuite commentées, en s'attachant à relier ces cas particuliers à des problématiques plus larges de maintien en exploitation de structures vieillissantes et parfois endommagées, et en proposant des méthodes de suivi globales qui intègrent les développements les plus récents dans le domaine de l'évaluation des structures.

## **DIAGNOSTIC OF EXISTING PORT AND MARITIME STRUCTURES AN HELPFULL TOOL FOR PORT MANAGERS**

*The managers of existing maritime port structures have to face several issues: ageing of structures, environmental risks, maintenance, adaptation to new equipments and new vessels. The assessment of structures condition is therefore a critical element to help managers to make the proper decisions to ensure a continuous exploitation and to avoid exploitation losses.*

*This assessment is done through a diagnosis which aims to give the objective elements to make the proper choices.*

*After a general presentation, the diagnosis issues are illustrated by the presentation of real studies on a grain dock in La Rochelle and an oil wharf in Guadeloupe Island. In each of these studies, managers' issues are exposed, and the means and methods used to address them are presented.*

*The conclusions of these diagnoses are then commented, with a focus on linking these specific cases to broader issues and pointing on the difficulties for the assessment and refurbishing of old structures.*

# **RENFORCEMENT PARASISMIQUE PAR MATERIAUX COMPOSITES DE POTEAUX, VOILES BA ET DE MURS MAÇONNÉS : LES ENSEIGNEMENTS DU PROGRAMME ANR : IN.PER.MISE.**

P. HAMELIN, E. FERRIER, L. MICHEL,  
M. QUIRTANT, R. SADONE, J.V. HECK,  
R. SALHAOUI, J. MERCIER, C. TOURNEUR,  
L. DEMILECamps

L'objectif du programme IN.PER.MISE porte sur la recherche et le développement de procédés constructifs innovants valorisant l'utilisation de composites carbone-époxy pour assurer le renforcement et la mise en conformité d'ouvrages existants en béton armé ou maçonnes sous l'action de sollicitations accidentelles de type sismique modifiées depuis 2011 par la révision de la carte des aléas sismiques au plan national. Il a consisté à développer et à valider des méthodes expérimentales nouvelles adaptées à la caractérisation des mécanismes de transfert de charge entre composite et substrat et à l'analyse du comportement d'éléments de structures de référence (poteaux, voiles, murs maçonnes) sollicités en flexion composée. Les gains de performances en terme de résistance, ductilité, énergie de déformation ont pu être étudiés de façon comparative en fonction des différents procédés constructifs par l'identification d'indices performantiels adaptés. L'efficacité de ces technologies de renforcement et de mise en sécurité des ouvrages existants a pu être démontrée. L'expertise des systèmes de réhabilitation les plus performants confirme qu'il est possible, par des évolutions conceptuelles à caractère technologique guidées par la compréhension des modes d'endommagement et de ruine, de faire encore progresser la fiabilité de ces procédés.

Le transfert de charge entre composite et substrat (béton ou maçonnerie) ainsi que la connexion entre éléments de structure (ex. mur/semelle) ont été améliorés en résistance et en déformation ultime par le développement de procédés constructifs innovants consistant à améliorer l'ancrage des renforts composites collés, par l'ajout de micro-mèches, de mèches d'ancrage grande profondeur (mèche à chas) ou le formage d'ancrages crénelés continus en extrémité de lamelle carbone (renforts pultrudés). L'expérimentation de structures « modèles » (poteaux, voiles, murs maçonnes) non renforcés et renforcés sollicités en flexion composée sous des chargements horizontaux cycliques de niveaux progressifs ont permis de valider l'identification d'indicateurs de performance permettant la comparaison des différents procédés constructifs. L'analyse des mécanismes d'endommagement et de ruine pour chaque type de structure a permis d'établir les limites de validité des méthodes de dimensionnement existantes.

Les capacités de renforcement par composites des ouvrages existants vis-à-vis de sollicitations accidentelles ou extrêmes (séisme, choc, explosion) ont été confirmées. L'importance des conditions d'exécution et de mise en œuvre de ces renforts pour atteindre les niveaux de performances souhaités a une nouvelle fois été soulignée. Les principaux leviers identifiés permettant d'assurer la tenue sismique des éléments porteurs concernent d'une part l'amélioration significative des conditions d'ancrage et de transfert de charge entre renforts composites et substrats (béton, blocs maçonnes) et d'autre part, l'optimisation des procédures de drapage ou de collage des renforts sur les éléments structuraux en fonction de différents critères considérant les gains de résistance à la traction, au cisaillement mais aussi l'aptitude à la déformation par un contrôle des courbures pilotées par la fissuration ou le contrôle des rotations au niveau des conditions de liaison. La nécessité d'assurer les gains de résistance, de ductilité, de dissipation énergétique en fonction de

la température (conditions d'incendie souvent associées aux dégradations sismiques) ont ouvert une nouvelle orientation de recherche visant à substituer aux composites à matrices polymères, des textiles techniques imprégnés par des matrices minérales (TRC). Cette orientation est soutenue par deux pôles de compétitivité (Techteria, Plastipolis) et fait l'objet de programme de recherche FUI et d'actions européennes dans le cadre du RILEM.

## **STRENGTHENING AND RETROFITTING OF EXISTING STRUCTURES MADE OF REINFORCED CONCRETE OR MASONRY UNDER THE ACTION OF SEISMIC LOADING: RESEARCH PROJECT IN.PERMISE**

*The objective of this program is on research and development of innovative construction methods promoting the use of carbon-epoxy composite to ensure the strengthening and retrofitting of existing structures in reinforced concrete or masonry under the action of accidental seismic loading type changed since 2011 by the revision of the national seismic hazard map. The project has been develop and validate new experimental methods for characterizing the mechanisms of load transfer between substrate and composite and analysis of the behavior of reference structural elements (columns, walls, masonry walls) loaded by flexure and compression. Performance gains in terms of strength, ductility, and strain energy have been studied comparatively for the different construction processes by identifying suitable performance-oriented indices. The effectiveness of these technologies to strengthen security and development of existing structures could be demonstrated. The expertise of rehabilitation systems confirms that it is possible to improve the existing strengthening system based on anchorage system development.*

*Development and validation of experimental methods allow, across the material, to optimize the load transfer between substrate and composite and at the scale of the structure to improve strength and ductility. The load transfer between substrate and composite (concrete or masonry) and the connection between structural elements (eg wall / basement) were improved in strength and ultimate strain by the development of innovative construction methods of improving the anchoring reinforcements bonded composite, by the addition of micro-strands, roving anchoring depth or forming anchorage crenellated continuous strip carbon end (pultruded reinforcements). The experimental structures of "models" (columns, walls, masonry walls) unreinforced and reinforced solicited in bending under horizontal cyclic loads of progressive levels were used to validate the identification of performance indicators for comparing different constructive methods. Analysis of damage mechanisms and decay for each type of structure has established the limits of validity of existing design methods.*

*Capacity of FRP retrofitted building under accidental or extreme loads (earthquakes, shock, and explosion) were confirmed. The importance of implementation and workability of these reinforcements to achieve the desired performance levels once again has been highlighted. The main point outline by the project was to ensure the seismic resistance of the bearing elements included action on the significant improvement of anchorage and load transfer between reinforcements and composite substrates (concrete, masonry blocks) and secondly, optimization procedures draping or gluing on the reinforcements on structural elements according to various criteria whereas tensile strength gains, shear but also the ability to control the deformation, cracking or rotation control at the level of target safety level. The need to ensure gains strength, ductility, energy dissipation as a*

*function of temperature (fire conditions often associated with seismic damage) opened a new direction of research to replace the polymer matrix composites, textiles Technical impregnated by mineral matrices (TRC). This orientation is supported by two clusters (Techterra, Plastipolis) and is the subject of research programs FUI and European equities as part of RILEM.*

## **RENFORCEMENT ET REMISE EN PEINTURE DES PONTS DU DANCOURT**

Jacques BERTHELLEMY, Olivier CROS

Des travaux importants et à caractère très innovant ont été menés à bien pour prolonger la durabilité des deux ponts d'une autoroute française fréquentée par une circulation lourde depuis 40 ans. La structure des ponts a été renforcée pour prolonger leur résistance en fatigue :

- Soudage d'une tôle inclinée continue à l'extérieur des poutres de rive pour augmenter la sécurité à l'ELU et la robustesse en fatigue,
- Application de techniques de parachèvement par refusion TIG sur les goussets,
- Collage de fibres de carbone sur semelle inférieure des poutres principales aux extrémités des semelles additionnelles existantes. Le module d'élasticité de ces fibres doit être élevé et atteint 400 000 MPa.

Par ailleurs, une option innovante mixte de décapage-avivage s'est avérée plus économique que le décapage complet traditionnel.

## **STRUCTURAL RETROFIT AND REFURBISMENT OF THE CORROSION PROTECTION AT THE DANCOURT MOTORWAY BRIDGES**

*Important works of very innovative character were brought to a successful conclusion to improve the durability of the bridges decks of a French motorway carrying heavy traffic since 40 years. The structure of the bridges was strengthened to extend their fatigue resistance :*

- *Addition of a continuous welded steel plate tilted outside of the side beams to increase the safety at the ULS and the robustness in fatigue,*
- *Metal improvement with TIG refusion of the gussets were performed,*
- *Sticking of carbon fibres on lower steel flanges of the main beams at the extremities of the existing additional plates. These fibres need a high Young modulus of 400 000 MPa*

*In addition, a mixed innovative option of complete-partial sandblasting has proved more economic than the usual complete sandblasting cleaning method.*