

Fiche bilan de l'appel à projets Ponts Connectés (2021-2023)

Nom du projet : GeRICO - Gestion des Risques structurels par ponts COnnectés

LE CONSORTIUM

Partenaires : SCE (porteur du projet) / STRAINS SA / OSMOS GROUP SA / Angers Loire Métropole. Autre partenaire : Département de Loire-Atlantique

Montant de la subvention : 148 342 € HT

Ouvrages instrumentés :

- Grand pont de Mauves-sur-Loire / RD 31 / CD 44: Pont cage en fer puddlé de 1882. Poutres latérales et treillis multiples rénové en 2020. 482 ml 11 travées, appuis sur pieux bois
- Pont Du Haut Village / RD 37 St Julien-de-Concelles / CD 44 : Pont cage en fer puddlé de 1882. Poutres latérales et treillis multiples. 225 ml 5 travées, appuis sur pieux bois
- Pont de Verdun sur la Maine à Angers : Ouvrage en maçonnerie, 110ml, 8 travées, appuis sur pieux bois

LE PROJET – CAS DES PONTS-CAGES METALLIQUES

GeRICO comporte un premier volet d'instrumentation visant à recueillir un spectre large d'informations pour les ouvrages ponts-cages métalliques : charge des convois, comportement sous trafic, comportement à vide. L'instrumentation combine extensomètres en base longue de type Corde optique pour les mesures de déformations dynamiques, accéléromètres pour les mesures de vibrations et inclinomètres pour les évolutions lentes et saisonnières. Le projet s'attache à considérer une approche globale de l'ensemble des données, à réaliser des analyses de corrélations croisées entre différentes grandeurs physiques (fusion de données) et à leur appliquer des méthodes statistiques d'apprentissage en vue de la détection d'anomalies.

De manière à préciser l'information recueillie et à la transformer en connaissance, un modèle de calcul EF est réalisé pour chaque ouvrage. Ce modèle inductif simule le comportement en statique et en dynamique, pour des situations courantes et pour des situations accidentelles. Un lien bidirectionnel est donc réalisé entre le modèle issu de la mesure en continu (modèle déductif) et le modèle de calcul (inductif). Les calibrations/appairages se font surtout à partir d'analyses dynamiques sur la base de mesures à haute fréquence et sur la base d'analyses statiques.

Objectifs spécifiques au projet GeRICO pour les ouvrages de type Pont-cages métalliques

- Faciliter la corrélation jumeaux numériques/ouvrage réel en s'appuyant sur une chaîne d'acquisition de mesures à haute fréquence, par le biais de l'analyse des modes propres
- D'effectuer le pesage et le comptage des véhicules >3.5t
- Savoir rationaliser l'instrumentation des ouvrages nécessaire au développement d'une maintenance prédictive d'Ouvrages d'Art
- Définir des indicateurs synthétiques du comportement des ouvrages, actualisés en continu
- De surveiller le comportement d'appuis présentant un risque d'affouillement
- Définir une démarche méthodologique synthétique sur la typologie d'ouvrage de nature à homogénéiser les approches des bureaux d'études et gestionnaires

LES AVANCEES TECHNIQUES

L'instrumentation mise en œuvre, satisfaisant à l'exigence d'un taux d'échantillonnage important (100 Hz) et disposant d'une alimentation filaire, a permis de recueillir en temps réel et en continu toutes ces informations pendant 18 à 24 mois, d'évaluer les contraintes diffusées dans la structure et de fournir des données d'entrée pour le recalcul et la modélisation, afin de définir des indicateurs pertinents pour suivre l'état de santé de l'ouvrage.

Le principe de mesure en continu déployé ainsi que son exploitation a ainsi permis :

- Le calibrage de la réponse de l'ouvrage grâce à des tests de chargement
- L'enregistrement et l'horodatage de tout évènement structurellement significatif
- L'enregistrement et l'horodatage des passages de convois entraînant des déformations significatives,
- L'évaluation de la souplesse des poutres et de leur évolution au cours du temps, ainsi que la vérification du retour de la structure à son état initial après ces passages,
- L'analyse des modes de vibration des poutres sous sollicitations dynamiques, sous 30 Hz. A cet effet, les données ont été traitées par un algorithme de type « Eigensystem Realization Algorithm » (ERA). Il identifie les motifs correspondant à des modes de vibration propres par une analyse d'une matrice de covariance (dite Matrice de Hankel des paramètres de Markov) construite à partir des mesures d'un groupe cohérent de capteurs. On obtient ainsi un diagramme de stabilisation filtrant les fréquences les plus représentées et d'associer à chacune d'entre elles un taux d'amortissement ainsi qu'une valeur par capteur, correspondant à sa contribution au mode identifié, et à partir de laquelle on peut déduire une forme de mode.
- L'analyse du comportement à long terme de l'ouvrage en exploitant les valeurs moyennes des mesures sur des plages de temps définies : heure, jour, semaine, mois, année. Cette analyse est complétée par une étude des corrélations entre variations de température et évolutions de la structure afin de distinguer les tendances à long terme des tendances saisonnières.
- Le constat que l'utilisation, aux fins de l'Analyse Modale Opérationnelle, des seules données dont l'enregistrement serait déclenché au passage de véhicule est suffisante plutôt que de réaliser des enregistrements longs sous bruit ambiant

Les Jumeaux numériques des deux ouvrages de type pont-cage ont été montés et confortés avec corrélation avancée des comportements dynamiques (modes propres). Les épreuves statiques et dynamiques réalisées en Avril 2022 ont permis de confirmer un calibrage fin des modèles réalisés avec deux niveaux de détail :



- Modèles complexes réalisés avec le logiciel PYTHAGORE avec recours à des méthodes automatiques d'appairage peu usitées en Ouvrages d'Art, sur un nombre de modes important. La méthodologie générale suivie est largement inspirée du livre « Finite element model updating in structural dynamics » de M. I. Friswell et J. E. Mottershead.
- Modèles simplifiés réalisés avec le logiciel à barres ST1, modèles adaptés par rapport à ceux réalisés avant GeRICO pour des études statiques de portance. L'appairage des modes a été réalisé manuellement et restreint aux modes principaux.

Retour d'expérience sur l'Analyse Modale Opérationnelle et la démarche de jumeau numérique

L'appairage effectif du jumeau numérique a permis de recouper et conforter, voire de préciser, des analyses permises avec les algorithmes de pesage en marche (Les algorithmes WIM restent seuls capables de contrôles opérationnels quasi immédiats). Des rapports statistiques ont été établis pointant des évènements exceptionnels (avec informations de vitesse, de poids et de direction, et confirmation de retour à l'état initial) s'avérant cohérents avec le suivi par le gestionnaire.

Nous avons pu vérifier que les modes de flexion du tablier étaient aussi bien identifiés, avec des caractéristiques identiques, au moyen des cordes optiques qu'au moyen des accéléromètres.

Comme attendu, les modes de torsion sont assez éloignés et ne peuvent être ciblés pour l'analyse comportementale. Cela permet d'optimiser l'instrumentation d'un ouvrage dont l'analyse modale se limiterait aux modes en flexion, en s'affranchissant du recours à des accéléromètres par exemple.

Les influences saisonnières et des niveaux hydrauliques ont été également appréhendés, révélant une amplitude faible sur près de 20 mois d'instrumentation et pouvant être clairement distinguée des comportements liés à l'exploitation.

Nous extrayons de notre expérience quelques bonnes pratiques pour mener une démarche de recalage de modèle, par analyse modale opérationnelle ou autre :

- Il est utile de monter le modèle numérique pour définir l'instrumentation. Le fait de faire un premier modèle, même imparfait ou simple, permet d'avoir une idée des modes propres de l'ouvrage et de la façon dont il se comporte. Cela permet d'aiguiller le choix de l'instrumentation.
- Le recalage ne permet pas de lever toutes les incertitudes, l'étape d'étude précise du dossier d'ouvrage est primordiale : son degré de précision, tant géométrique que sur la nature des matériaux, constitue un facteur de complexité important pour l'approche proposée. Il convient de lever les incertitudes par du contrôle non destructif (mesure des sections, plan précis etc.). L'analyse du comportement du modèle et de sa corrélation ont permis aussi de cibler des investigations sur certaines membrures qui ont confirmé les doutes sur les sections réelles représentées sur archives. Le recalage de modèle intervient dans un second temps, en tentant de lever d'autres incertitudes sur le fonctionnement de l'ouvrage par exemple. Ainsi, le modèle doit appréhender les blocages potentiels d'appuis du fait de la corrosion par exemple.
- Les cordes optiques mesurant des déformations doivent être placées aux endroits où le comportement de l'élément est un comportement de poutre, en évitant donc les nœuds d'assemblage des structures, cela facilite grandement la comparaison entre les déformations d'un modèle « classique » et celles mesurées (sur 1 mètre) par la corde optique. Dans le cas contraire il faudra faire appel à des modélisations plus complexes.
- L'ensemble du recalage est soumis à la formation des paires de mode, cet appariage doit être soigné.

Réponse aux enjeux de maintenance prédictive

Nous avons simulé le comportement de la structure par introduction de défaillances locales dans la structure. Il apparaît que la typologie d'ouvrage et la redondance des éléments verticaux et diagonaux participe à une très faible sensibilité de la signature comportementale de l'ouvrage vis-à-vis des défaillances locales testées. Techniquement, il est difficile de détecter et de localiser ce type de désordre avec l'instrumentation en place dont l'objet est la surveillance du comportement global. Le constat a été similaire tant par le recours à une modélisation complexe qu'avec une modélisation simplifiée « low-cost ». De ce fait, la définition d'indicateurs synthétiques resterait propre à chaque ouvrage.

Pour surveiller ce type de désordre par le biais d'une analyse modale opérationnelle, il faudrait notamment considérer :

- L'application à des structures comportant moins de redondance des éléments structurels
- Un ciblage des catalogues de désordres sur les éléments particulièrement critiques de l'ouvrage

Les effets d'une simulation d'affouillement se sont avérés plus nettement détectables : L'affouillement impacte les modes transversaux de l'ouvrage. Pour suivre ce phénomène via une analyse modale opérationnelle il convient :

- De mettre en œuvre une instrumentation capable de capter les modes transversaux (là encore le montage d'un modèle numérique initial permet d'avoir une idée a priori de la forme de ces modes).
- De suivre leur évolution en fréquence. Une fréquence qui baisse peut-être le signe d'un affouillement.

- De suivre leur évolution en déformées : un mouvement latéral au-dessus d'une pile est un signe. Ce mouvement ne peut être vu que si des accéléromètres transversaux sont situés à l'aplomb de la pile. La tête de pile elle-même peut être instrumentée.

BENEFICES COLLECTIFS

La consolidation des informations, sur les ouvrages métalliques de type treillis, permet de renforcer le partage d'expérience et la capitalisation à plus grande échelle des corrélations entre les constats permis par une instrumentation adaptée et le comportement même des ouvrages d'autre part.

La méthodologie d'appairage des jumeaux numériques par analyse modale opérationnelle est nouvelle pour des structures Ouvrages d'Art. La bonne corrélation trouvée sur des ouvrages complexes démontre que la voie est à explorer plus avant dans l'objectif d'une maintenance prédictive pour des ouvrages plus simples. La Maîtrise des effets d'un catalogue prédéfini de désordres possibles permettra au gestionnaire de prendre sans délai des dispositions adaptées lors de la survenance de défaillances, ou indices de défaillances, localisées ou plus étendues

Sans que le suivi à distance du Pont Connecté puisse se substituer complètement aux visites périodiques, il doit permettre un usage plus ciblé des modes d'investigation lourds et coûteux et conduire le gestionnaire à adapter au fil du temps les usages de son infrastructure, dans l'objectif d'une préservation patrimoniale pour les ouvrages treillis en particulier.

CAS DU PONT DE VERDUN

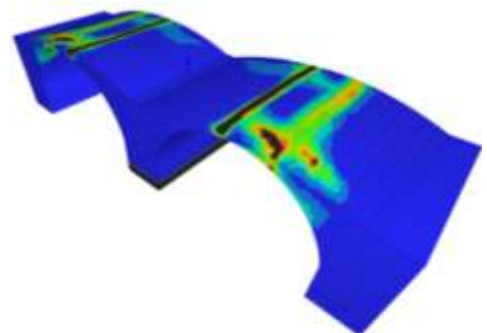
Le pont de Verdun est d'une typologie très différente et son étude a été donc menée très distinctement de celle des deux ouvrages ponts-cages. Pour autant, l'objectif était de nature similaire, à savoir l'appairage d'un modèle numérique avec l'ouvrage instrumenté de manière à détecter des modes de ruine, et plus précisément des modes de ruine du fait d'affouillements.

Les voûtes, culées piles et pieds de pile du pont de Verdun ont été modélisés en 3D sur le logiciel Digital Structure. Deux méthodologies de calcul élastoplastique ont été développées : La première permet d'évaluer la capacité d'un ouvrage ayant subi un tassement différentiel qui ne serait plus évolutif (cas du pont de Verdun après renforcement en pied). La seconde traite du cas où l'affouillement serait toujours évolutif, fait que l'on peut supposer pour le pont de Verdun d'après les récentes données de capteurs.

Le constat a été fait qu'il est possible d'évaluer l'évolution des dégradations de l'ouvrage étant donné une évolution des tassements différentiels des appuis (homogène ou de rotation) de façon numérique. Cette évolution peut être construite indépendamment de la connaissance des fondations, puisqu'elle corrèle simplement un déplacement observé au niveau de l'ouvrage à un niveau de dégradation.

L'analyse des modes de rupture sur le cas particulier du Pont de Verdun nous a permis d'extrapoler que la démarche de surveillance, et donc d'instrumentation, dans le cas non évolutif de l'ouvrage doit continuer à se concentrer sur les sujets suivants :

- L'apparition de doubles rotules en clef et au niveau des reins, caractéristique de la poursuite de l'affouillement homogène.
- L'apparition d'une fissuration « diagonale et traversante » dans les voûtes, caractéristique de la poursuite du phénomène de rotation d'appui.
- Surveiller l'affaissement local des bords de voûte en clef, mécanisme probable de rupture sous poids propre si la voûte a fissuré antérieurement par rotation différentielle des appuis.



PUBLICATIONS ASSOCIEES A GERICO

Le projet a été présenté en CoTiTa régionale à Jargeau le 13/10/2022, à la journée SHM France du 14 mars 2023 et au Young Engineer Colloquium de l'IABSE le 24/11/2023

Contribution à la conférence EWSHM 2024 en juin 2024 à Potsdam « *Application of a method for probabilistic fatigue from strain measurements on bridges* »

Contribution à la conférence IABMAS 2024 en juin 2024 à Copenhague « *Bridge Weigh-in-Motion applied to Heritage Iron Truss Bridges in France* »