



Une surveillance d'ouvrages en environnement côtier : exemple du pont de Radès - La Goulette à Tunis

Sébastien PIOT¹

1. SITES, 2 bis avenue du Centre, 92500 Rueil-Malmaison, France.
sebastien.piot@sites.fr

Résumé :

Le pont de Radès-La Goulette, ouvrage routier majeur de la zone portuaire de Tunis et mis en service en 2009, est équipé d'un système de surveillance de santé structurale (SHMS). Il est composé de capteurs, d'un système d'acquisition et d'un logiciel de supervision SIMON.e®. Ce système a été conçu pour délivrer à tout instant, et sur toute la durée de vie de l'ouvrage, des informations quantitatives sur les sollicitations subies par ses structures et l'évolution du comportement en réponse à ces sollicitations.

En conséquence, il intègre des disjonctions lui conférant des taux importants de disponibilité et de sécurité.

En complément à l'apport évident que le système d'information apporte aux experts structures et pathologies pour la validation ou l'évaluation des comportements de l'ouvrage, l'exploitation du système de monitoring permanent optimise les opérations globales de maintenance et surveillance de cet ouvrage routier en milieu maritime.

Mots-clés :

Génie côtier – Génie civil – Pont – SHMS – Surveillance de santé structurale – Capteurs – Maintenance – Aptitude au service – SIMON.e – Near-shore

1. Introduction

Le pont de Radès-La Goulette enjambe le chenal qui débouche dans le lac de Tunis et permet de franchir le canal de navigation du port de Tunis. Il a été inauguré en 2009, après cinq ans de travaux. C'est un pont à haubans extradossé, comportant une travée principale de 260 mètres, deux travées latérales de 120 m (voir figure 1) ainsi qu'un système de viaducs d'accès. Le caractère maritime de son environnement ainsi que le contexte géotechnique associé engendrent une agressivité sévère sur l'ouvrage. Elle est susceptible d'accélérer son vieillissement, et c'est une des raisons pour laquelle le gouvernement tunisien a entrepris de l'équiper d'un système de surveillance de santé structurale (Structural Health Monitoring System - SHMS).

2. Architecture

En première approche, un SHMS est composé d'un ensemble de capteurs, d'un système d'acquisition et d'une aide au diagnostic structurel.



Figure 1. Vue générale du pont de Radès-La Goulette.

Deux groupes de capteurs sont installés, en poste fixe, dans l'ouvrage et sur l'ouvrage. Le premier groupe est destiné à mesurer les sollicitations que subit l'ouvrage telles que le vent et la température ambiante. Le second mesure les réponses de l'ouvrage telles que des accélérations, des charges, des déformations et des déplacements.

Le SHMS doit enregistrer d'une manière continue tous ces paramètres, puisque ce sont les séries chronologiques des mesures qui vont être la base du diagnostic. Pour récolter ces données, un système de conditionnement et de stockage des signaux est installé en poste fixe. Son rôle est d'enregistrer, 24h sur 24 et 7 jours sur 7, les données des capteurs, sans défaillance. Le taux de disponibilité doit être élevé pour permettre de capitaliser l'historique de l'ouvrage. Ces données sont stockées et classées dans un serveur. Outre sa capacité d'archivage, il possède une fonction essentielle de communication qui permet aux utilisateurs de récolter d'une manière simple et fiable l'ensemble des données. Une seconde notion de sécurité élevée intervient, car seuls les utilisateurs habilités sont en mesure d'y accéder.

3. Les capteurs

3.1 Un système statique et dynamique

Les différents phénomènes à observer peuvent être de nature lente, c'est-à-dire qu'ils évoluent à des périodes de l'ordre de l'heure. On cite par exemple la température. Les capteurs associés sont qualifiés de statiques. Par opposition, des phénomènes tels que le vent ou les accélérations du tablier sont qualifiés de dynamiques puisque leurs données ne sont pertinentes que pour des fréquences de plusieurs dizaines de Hz.

Sur l'ouvrage, 55 capteurs ont été implantés ; près de la moitié d'entre eux observent des phénomènes dynamiques. Le tableau ci-dessous récapitule la répartition des capteurs.

Tableau 1. Récapitulatif des capteurs sur l'ouvrage

Capteur	Localisation	paramètre mesuré	fréquence	Quantité
Température	voussoir de clavage	température du béton	statique	14
	haubans	température des haubans	statique	2
	tablier	température de l'air	statique	1
	joint de chaussée	température des appuis	statique	2
Extensomètre à corde vibrante	voussoir de clavage	déformation du béton	statique	7
Inclinomètres	pylones	rotation des pylones	statique	4
Accéléromètres basse fréquence	tablier	accélération du tablier	dynamique	5
Capteur de déplacement	joints de chaussée	Mouvements des joints de chaussée	dynamique	6
Cellule de force	haubans	tension des haubans	dynamique	12
Anémomètre	tablier	vitesse du vent	dynamique	1
	tablier	direction du vent	dynamique	1
Total				55

3.2 Les capteurs mesurant les sollicitations de l'ouvrage

L'ouvrage est équipé d'une station météo qui enregistre, en continue, les données météo qui sollicitent l'ouvrage. Un anémomètre à ultra-sons est placé sur le tablier. La particularité de ce capteur est de mesurer les vitesses et directions du vent, avec de très bonnes capacités dynamiques et sans aucune pièce mobile. Plusieurs capteurs de température d'air sont répartis sur l'ouvrage, ce qui apporte une information sur l'état thermique de l'environnement.

3.3 Les capteurs mesurant les réponses de l'ouvrage

Ces capteurs observent les réponses de l'ouvrage. En premier lieu, un suivi par inclinomètres haute précision permet de vérifier les éventuelles rotations des pylônes, selon deux axes. Des cellules de force sont installées sur un échantillon de haubans et permettent de suivre la charge qu'ils reprennent sur le long terme. Leurs capacités dynamiques permettent aussi de caractériser le comportement vibratoire des haubans. Plusieurs accéléromètres basses-fréquences suivent le tablier afin de vérifier que sa réponse spectrale est bien conforme aux attentes. Des extensomètres sont noyés dans une section du tablier de l'ouvrage (voir figure 2) de manière à connaître l'évolution des contraintes qui y règnent et les confronter aux modèles prédictifs. Les abouts du tablier sont équipés de capteurs de déplacement, ce qui permet de constater, tout au long de la vie de l'ouvrage, que les appareils d'appuis remplissent correctement leur fonction et que le comportement thermo-mécanique est bien en conformité. Ce dispositif est

complété par une multitude de sondes de températures noyées qui fournissent l'état thermique des matériaux de l'ouvrage.

4. Système de conditionnement et d'acquisition

Jadis, les appareillages nécessaires aux acquisitions statiques et dynamiques étaient des systèmes séparés. Aujourd'hui, sur le pont de Radès-La Goulette, un système d'acquisition unique permet de gérer l'ensemble des capteurs. Ceci augmente la souplesse d'utilisation, réduit les coûts et ne nécessite plus la gestion fastidieuse de données issues d'appareillages de nature différente. Les impératifs de haut taux de disponibilité interdisent l'utilisation de carte d'acquisition de laboratoire, présentant un niveau de fiabilité insuffisant. Le pont de Radès-La Goulette a été équipé d'un système de mesure industriel avec une topologie d'acquisition distribuée. Celle-ci consiste à effectuer les mesures au moyen de conditionneurs placés au plus près des capteurs et d'acheminer ensuite les données en format numérique. L'ensemble des conditionneurs est connecté sur un backbone à fibre optique dédié, qui permet de transférer toutes les données des capteurs, statiques et dynamiques, jusqu'en salle de contrôle.

5. L'application et le serveur SHMS

Le serveur du SHMS est une machine installée en salle de contrôle à côté de l'ouvrage. Ses composants matériels sont sélectionnés afin d'assurer un haut taux de disponibilité, jouant notamment sur la redondance des fonctions. Il est équipé d'un stockage de masse de large capacité. Le logiciel SIMON.e® pour Système d'Information de MONItoring par Internet, (voir figure 3) supervise l'ensemble du système. Il se charge de gérer la chaîne d'acquisition, d'en récolter les mesures et de les diffuser. Il les archive et présente, à l'utilisateur, un affichage en temps réel à plusieurs niveaux. Le niveau général est une synthèse du comportement d'ouvrage, indiquant notamment d'un coup d'œil, tout dysfonctionnement. Des fenêtres plus détaillées permettent de visualiser plus finement le comportement de chaque partie de l'ouvrage. Elles offrent en outre des analyses croisées entre capteurs. Le serveur SHMS est largement communicant, puisqu'il envoie, par les moyens les plus modernes, l'état de fonctionnement de l'ouvrage aux décideurs. Par ailleurs, il gère différents niveaux d'accès qui vont du surveillant de sécurité jusqu'à l'administrateur système.

6. L'alerte en temps réel

Pour chaque capteur, on associe des bornes entre lesquelles il peut évoluer sans déclencher d'alerte. Ces bornes sont définies à partir des résultats obtenus lors des épreuves de chargement mais aussi à l'issue d'une période d'apprentissage. En cas de dépassement des bornes, les alertes sont affichées immédiatement à l'écran dans la salle de contrôle à proximité de l'ouvrage et donnent lieu à l'envoi de courriels d'alerte, voire de SMS sur les téléphones portables des gestionnaires. Le système possède une fonction

de détection de défaillance de capteur, qui donne lieu à un message d'information sans déclencher d'alerte.



Fig. 2. Pose d'extensomètres dans le tablier.

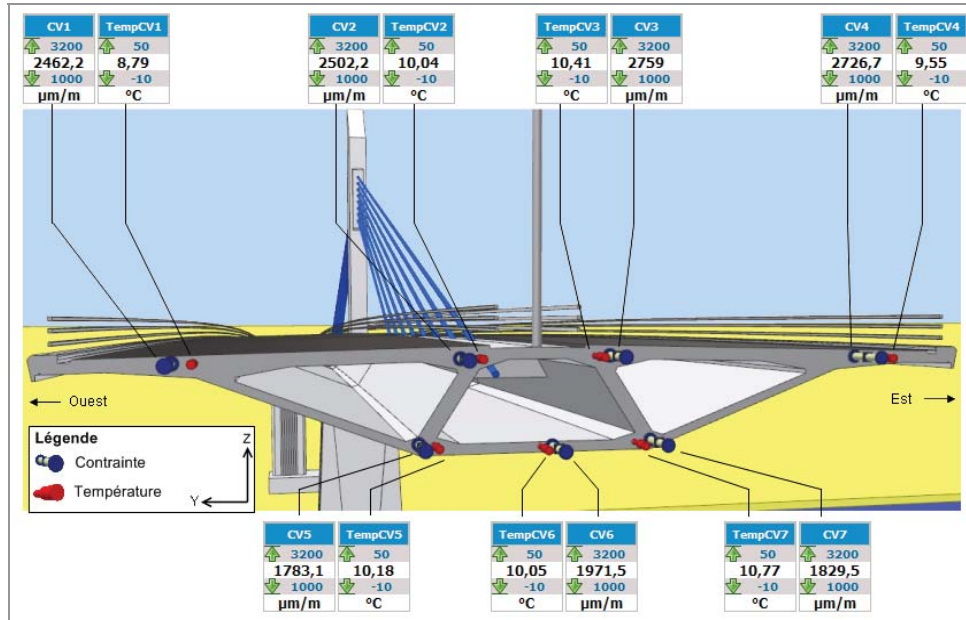


Figure 3. Exemple de vue SIMON.e.

6. Le diagnostic structurel

Les données issues du SHMS sont ensuite exploitées suivant plusieurs niveaux. Un premier niveau d'analyse est effectué conjointement par un binôme instrumentiste/gestionnaire. La première étape consiste à valider les données des

capteurs en termes météorologiques. Parallèlement, on procède au nettoyage des courbes si nécessaire. Ensuite, les capteurs sont croisés entre eux pour en extraire les corrélations. Ceci permet de rechercher des comportements singuliers. Un rapport est établi et attire l'attention sur les phénomènes potentiellement suspects. Ces données pré-analysées peuvent être ensuite transmises, si nécessaire, aux experts en pathologies d'ouvrage d'art pour l'analyse approfondie lors d'occurrence d'événements anormaux.

7. Conclusion

Le Pont de Rades la Goulette, d'une importance stratégique pour la région tunisoise et ses installations portuaires est situé dans un environnement maritime agressif pour ses structures et leur vieillissement. A ce titre, il bénéficie d'un système moderne de surveillance de santé structurelle. Ce SHMS permet d'apprécier, en continu, l'aptitude au service de l'ouvrage durant toute sa vie, d'évaluer quantitativement les sollicitations normales et exceptionnelles subies par l'ouvrage, tout en réduisant le coût de sa surveillance et maintenance. La mise en œuvre d'une telle disposition au stade de la conception de l'ouvrage relève d'une bonne pratique du Maître d'Ouvrage qui permet d'obtenir la connaissance détaillée du comportement de l'ouvrage dès sa mise en exploitation, annuler ou réduire drastiquement les risques d'accidents structurels et optimiser par anticipation, les coûts d'entretien.