
Instrumentation d'un quai portuaire pour le suivi de vieillissement de l'ouvrage : présentation des objectifs, des protocoles et des résultats de mesure issus du suivi de fabrication.

Yann Lecieux¹, Cyril Lupi¹, Virginie Gaillard², Romain Guyard¹, Dominique Leduc¹, Emmanuel Rozière³, Michel Roche¹, Franck Schoefs¹

¹ *Laboratoire GeM (UMR 6183), Université de Nantes, 2, rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 3 (France)
yann.lecieux@univ-nantes.fr*

² *Laboratoire GeM (UMR 6183), ICAM, Département Génie Electrique, 35 Avenue du champ de Manoeuvres, 44470 Carquefou, France*

³ *Laboratoire GeM (UMR 6183), École Centrale Nantes, 1 Rue de la Noë, 44300 Nantes (France)*

RÉSUMÉ. La communication présentée ici, a pour objet l'instrumentation du quai d'un terminal à marchandises commandé par le Grand Port Maritime de Nantes – Saint Nazaire. Cet ouvrage de 350 m de long par 50 m de large est équipé de capteurs pour un suivi de l'ouvrage en continu avec pour objectif d'acquérir la performance de l'infrastructure dans le temps. Deux résultats sont attendus. Il s'agira d'une part de proposer une instrumentation optimale pour analyser la pénétration des ions chlorures dans le béton et quantifier les risques de corrosion des armatures associées. On s'intéressera d'autre part à l'analyse du comportement réel des éléments structuraux, du quai (les poutres) afin de prolonger leur durée de vie vis à vis du dimensionnement conservatif des règlements de calcul.

ABSTRACT. The conference paper proposed here, deals with the instrumentation and the monitoring equipment of a new harbor quay ordered by the Nantes Saint-Nazaire Port's corporate. This concrete structure of 350 m in length and 50 m wide is equipped with sensors for continuous monitoring with the objective of recording the structure performance in time. Two outcomes are expected. The first one is to provide optimal solutions to analyze the chloride penetration into concrete in marine environment and the corrosion risk assessment. The second objective is to analyze the real behavior of the structural parts of the quay: the beams, in order to extend their useful lives, as regards with the calculation standards.

MOTS-CLÉS : Structure portuaire, Instrumentation, Béton, Monitoring, Résistivité électrique, Fibre optique.

KEYWORDS: Coastal structures, Instrumentation, Concrete, Electrical resistivity, Optical fiber.

1. Introduction

Les infrastructures portuaires en béton sont destinées à assurer leurs fonctions pendant une longue période de service alors qu'elles sont exposées à des conditions sévères (environnement et chargement) et qu'elles sont souvent très sensibles aux dégradations. Stratégiques pour les exploitants qui évoluent dans un marché extrêmement concurrentiel, leur conception et leur utilisation doivent être optimales au regard d'une approche de type life-cycle management.

Le projet d'instrumentation présenté ici, IMARECO (Instrumentation pour Maintenance Ré-ingénierie et Conception Optimisée) s'appuie sur la réalisation du "Grand Quai" commandé par le Grand Port Maritime de Nantes – Saint Nazaire. Il s'agit de la construction du quai d'un terminal à marchandises diverses et conteneurs (TMDC) situé à Montoir de Bretagne sur l'estuaire de la Loire. Ce projet vise à adosser les procédures de maintenance des nouvelles infrastructures portuaires à une instrumentation multi-capteurs dont l'objectif est d'acquiescer la performance de l'infrastructure dans le temps. Il a également pour but de contribuer au retour d'expérience. En effet, le caractère prototype, rare et en environnement complexe des structures portuaires (zones de dégradation multiples), génère une allocation des coûts spécifique : à la conception d'abord liée à la méconnaissance de certains effets et la non prise en compte de spécificités dans les règlements, puis ensuite à la maintenance liée à la difficulté d'inspection, la complexité des pathologies et le faible retour d'expérience. Par ce projet, couplant mesures in-situ et en laboratoire, l'objectif final est de contribuer à une optimisation de l'allocation des ressources intégrant le coût d'une instrumentation.

2. Présentation de l'ouvrage et des objectifs du monitoring

2.1. Le quai

L'ouvrage, commandé à l'entreprise de construction Bouygues TPRF, est un appontement de 350 m de long par 50 m de large dans le prolongement d'un quai existant (voir Figure 1). L'ensemble est constitué d'une structure composée d'éléments préfabriqués en béton armé, soutenus par un maillage de 579 pieux métalliques répartis sur 10 files longitudinales et 56 files transversales. Selon les zones du quai, différentes charges de service sont prévues (6, 10 ou 15 T/m²) ainsi que des voies de grues. Sur la structure en béton armé, une couche de remblai et un enrobé viennent habiller la plateforme. Des bollards et des défenses d'accostage viennent ensuite équiper l'ensemble. Pour stabiliser les berges sur lesquelles repose l'appontement, des inclusions en béton sont réalisées et un double rideau de palplanches avec un système de tirants est mis en œuvre.

2.2. Les objectifs du monitoring

Dans le cadre du projet IMARECO, on s'intéresse à deux problématiques distinctes :

- Le développement d'une instrumentation optimale pour l'analyse de la pénétration des ions chlorures dans le béton et des risques de corrosion des armatures associées ;
- L'analyse du comportement réel des éléments structuraux que nous appellerons "poutres courtes" (du fait du ratio longueur et dimensions de la section) afin de prolonger leur durée de vie vis à vis du dimensionnement conservatif des règlements de calcul.

Le quai est constitué d'éléments préfabriqués agencés suivant le schéma de la Figure 1. Des coques préfabriquées sont positionnées sur les têtes de pieux. La partie intérieure est renforcée avec des ferrailage avant de couler du béton entre ces dernières pour former les "poutres courtes" ainsi que sur la partie supérieure pour la dalle.

Les phénomènes associés au vieillissement, tels que la pénétration des chlorures, la fissuration ou les déformations associées ont une cinétique lente. Pour valider l'ensemble de la chaîne de mesure déployée dans ce projet, un objectif secondaire est d'effectuer le suivi du processus de fabrication avec les capteurs utilisés pour le suivi de vieillissement. On s'intéressera donc à l'évolution du béton immédiatement après le coulage. Au delà de l'aspect validation, nous espérons obtenir lors de cette phase des informations pertinentes pour le maître d'œuvre susceptibles de l'aider à améliorer ses procédures ou de détecter d'éventuels défauts de qualité lors de la phase de chantier. Un tel résultat justifierait alors une partie du coût de l'instrumentation équipant la structure, favorisant ainsi l'emploi d'un système de monitoring dans les futures structures côtières ou offshore.

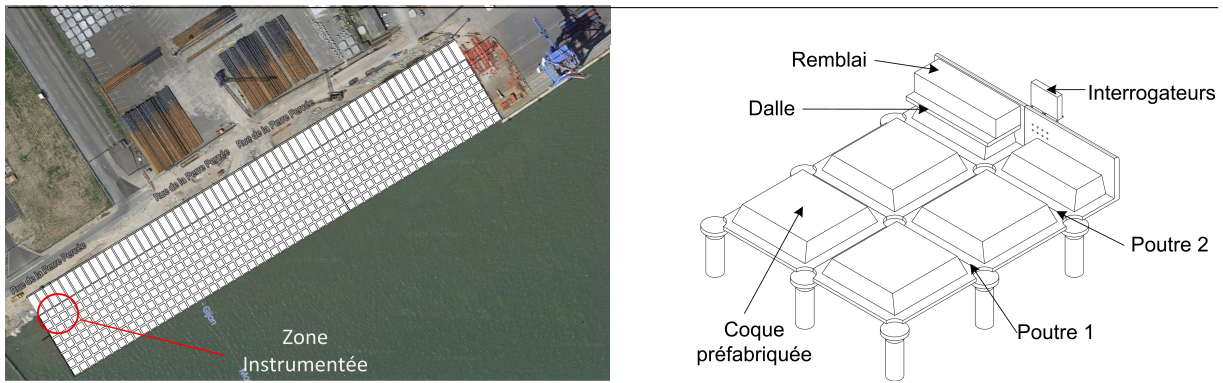


Figure 1 – L'ouvrage instrumenté.

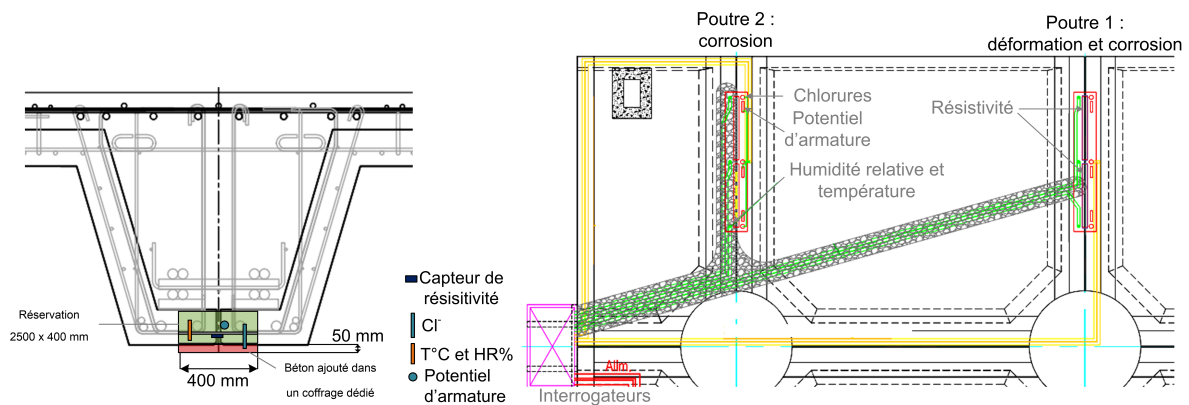


Figure 2 – Positionnement des capteurs pour le suivi de pénétration des chlorures.

3. Positionnement et technologies des capteurs utilisés

Deux poutres situées en extrémités du quai sont instrumenté pour le suivi de pénétration des ions chlorures et le vieillissement associé suivant les schémas de la Figure 2. Ces poutres sont repérés sur la Figure 1.

Pour chaque poutre, Le choix a été fait d'associer, deux capteurs de résistivité suivant la technologie proposée dans [LEC 15], 3 capteurs de chlorures (capteurs physico-chimiques avec 3 niveaux d'électrolytes, 3 mesures de potentiel d'armature, 3 sondes de mesure d'humidité et de température, des sondes PT 100 et une fibre continue pour une mesure simultanée de déformation et de température avec un interrogateur Brillouin (de type NEUBROSCOPE).

Ces capteurs sont destinés à mesurer les évolutions du béton liés au vieillissement de l'ouvrage. La résistivité électrique vise à détecter de manière précoce la pénétration des ions chlorures dans le milieu. Celle-ci dépend, de la porosité du béton, de sa teneur en eau, de la concentration en chlorure de l'électrolyte ainsi que de la température du milieu. Les capteurs de résistivité sont donc utilisés en association avec les capteurs d'humidités et de températures. Les capteurs de chlorures sont destinés à détecter le front de chlorure au moment où ce dernier atteint les armatures les plus proches de l'enrobage, avant que le processus de corrosion ne débute. Enfin, les fibres optiques ont vocation à identifier les désordres découlant de la corrosion : la fissuration du béton. Les capteurs d'humidité ont été étalonnés suivant la norme [AFN 99]. Pour la mesure de résistivité, nous avons suivi la procédure décrite dans [LEC 15] en procédant à un étalonnage des capteurs dans un milieu modèle (ici de l'eau de résistivité connue) de même volume que le béton en prenant en compte les ferrallages réels (voir Figure 3). Ces résultats de mesure sont également utilisés pour valider le modèle numérique nécessaire à l'interprétation des mesures effectués in-situ.

La poutre 1 est également équipée de 15 extensomètres à fibre optiques (voir Figure (4)). Ils sont positionnés suivant le plan de symétrie de la poutre à différentes hauteur de la fibre neutre. Ces mesures de déformations doivent permettre de comprendre le fonctionnement réel de la poutre. Les extensomètres sont associés à des réseaux de Bragg libres de déformations pour mesurer la température ainsi qu'à des fibres optiques utilisées pour la mesure

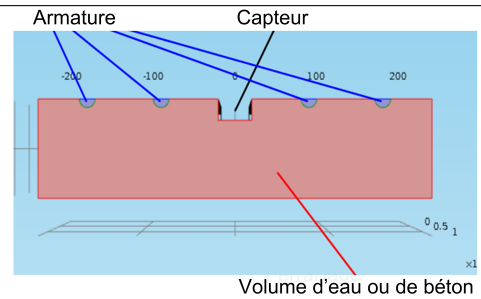
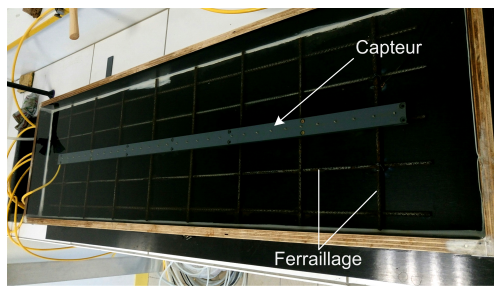


Figure 3 – Capteurs de résistivité : étalonnage en laboratoire et modèle numérique (COMSOL).

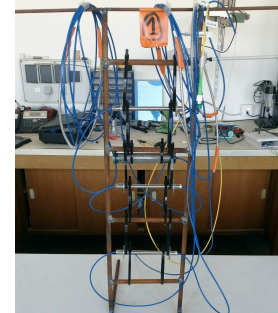
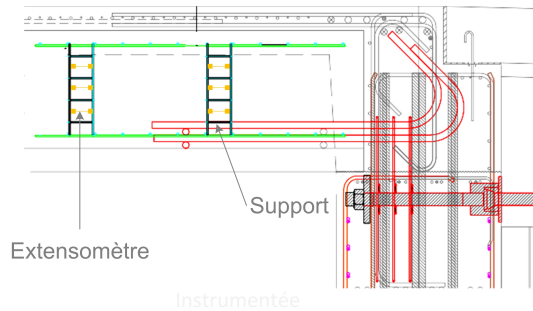


Figure 4 – Instrumentation pour la mesure de déformation, positionnement et détail du montage.

simultanée de déformation et de température. L'ensemble de cette chaîne est étalonnée en laboratoire en procédant à des cycles de chauffage et de refroidissement dans une enceinte thermique.

4. Tests en laboratoire

En parallèles des mesures in-situ, des essais sont menés en laboratoire. Ceux-ci sont regroupés en 3 catégories :

- Le suivi du matériaux notamment la maturométrie et le suivi du retrait et des modules d'élasticité ;
- Des essais de marnage accélérés ;
- Des essais sur des structures à échelle réduite.

5. Résultats de suivi du process

Les résultats du suivi de l'évolution des propriétés du béton effectué avec l'ensemble des capteurs sur site et en laboratoire au cours des trois premiers mois après le coulage seront présentés lors de la conférence.

Remerciements

Le projet IMARECO est porté par l'Université de Nantes, le Grand Port de Nantes-Saint Nazaire, la sociétés KEOPS, et l'entreprise Bouygues TPRF. Il est financé par la région Pays de la Loire. Les auteurs remercient l'ensemble des membres du consortium ainsi que la région Pays de la Loire pour leur implication dans le projet.

6. Bibliographie

[AFN 99] AFNOR, *Norme NFX 15-119*, AFNOR, 1999.

[LEC 15] LECIEUX Y., SCHOEFS F., BONNET S., LECIEUX T., LOPES S. P., « Quantification and uncertainty analysis of a structural monitoring device : detection of chloride in concrete using DC electrical resistivity measurement », *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 30, n° 3, p. 216-232, 2015.