

Surveillance et diagnostic de comportement d'ouvrage par nivellement hydrostatique de précision

■ Patrick LETEURTRE, Directeur de la société FOGALE Nanotech

Surveiller, contrôler un ouvrage afin de détecter un endommagement, évaluer son importance, son évolution, l'échéance d'une réparation, tels sont aujourd'hui les enjeux pour garantir l'intégrité d'un ouvrage de génie civil, prolonger sa durée de vie ou réduire le coût des aléas dans les phases de construction. Pour ce faire, il faut pouvoir mettre à disposition du gestionnaire d'ouvrage, du maître d'œuvre voire de l'assureur, un modèle qui lui permettra de "voir", comprendre, et prévoir le comportement de l'ouvrage et ceci dans sa globalité. C'est pour répondre à cet objectif que la société Fogale Nanotech a développé des capteurs et des systèmes de haute précision qui élaborent un modèle de mouvement permettant d'effectuer un diagnostic sur "l'état de santé" d'un ouvrage et des prévisions sur son comportement.

Parmi ces capteurs, le système de nivellement hydrostatique HLS est un des outils essentiels car il fournit les mesures permettant de contrôler la stabilité globale d'un ouvrage tout en séparant les mouvements d'ensemble des mouvements différentiels entre les diverses parties. A partir de quelques exemples, nous allons montrer l'apport du capteur de nivellement hydrostatique à la stratégie de surveillance ou de diagnostic de comportement d'ouvrage.

■ MOTS CLES

surveillance d'ouvrage, stabilité, auscultation, maintenance prédictive, nivellement hydrostatique, capteur HLS

Déjà incontournable pour aligner et contrôler précisément la géométrie des grandes machines industrielles ou de physique (synchrotron, télescope, grand alternateur, etc...) le capteur de nivellement hydrostatique de très haute résolution HLS (Hydrostatic Levelling System) répond particulièrement bien aux attentes du génie civil en matière de contrôle de stabilité et de prévision de comportement des ouvrages en vue de maintenance prédictive.

Surveiller, contrôler, voir et comprendre les interactions sol structure, détecter et localiser les déplacements différentiels de l'ouvrage souvent sources d'endommagement, leurs évolutions, telles sont les possibilités qu'offrent les mesures de ce capteur pour diagnostiquer très rapidement le comportement d'un ouvrage. La précision des mesures de ce système (typiquement de quelques microns à quelques dixièmes de millimètre sur des points éloignés de plusieurs centaines de mètres) associée à l'enregistrement continu des données permettent d'analyser en temps "quasi-réel" les déplacements de l'ouvrage tout en dissociant les mouvements continus et permanents (tassement de sol, évolution d'un endommagement...) des mouvements périodiques ou occasionnels (effets thermiques journaliers et saisonniers, variation de hauteur d'une nappe phréatique, etc...)

Si le nivellement par niveau hydrostatique a toujours été utilisé par les constructeurs de bâtiments, de routes ou d'ouvrages d'art il a quelquefois, faute d'avoir été bien utilisé, été décrié pour ces mesures entachées d'erreurs. Aussi, avant d'illustrer par des exemples d'applications les avantages de cette technique, il nous est apparu nécessaire de rappeler les quelques

éléments essentiels à l'emploi de cette technique qui, convenablement employée, permet de réaliser des mesures remarquablement fiables et précises. Une fois les précautions de mise en œuvre respectées, ce système de mesure devient un outil économique et redoutablement efficace pour contrôler et diagnostiquer rapidement la stabilité des ouvrages.

Rappels Techniques sur le nivellement hydrostatique

Destiné à la mesure de nivellement de haute précision entre plusieurs points, ce système est basé sur le principe des vases communicants et a le grand avantage d'utiliser la surface libre d'un liquide comme référentiel de mesure. Utiliser un référentiel hydraulique pour effectuer des mesures de nivellement est particulièrement intéressant car il définit une référence horizontale uniquement soumise à la gravité c'est à dire indépendante des mouvements de l'ouvrage comme des mouvements de l'environnement.

Dans la pratique on crée ce plan horizontal de référence au moyen d'un liquide, en général de l'eau de ville, en équilibre hydrostatique dans des pots de mesure reliés par des tubes. Les variations d'altitude sont décelées par les variations de hauteur du liquide dans les pots, cette variation étant mesurée par des capteurs de déplacement. Les techniques utilisées pour le capteur, partie sensible de l'instrumentation sont très variables. Elles vont de la fiole graduée aux systèmes électroniques qui généralement détectent le déplacement d'un flotteur. Pour le capteur HLS nous mettons en œuvre la technologie capacitive dont la qualité est de permettre des mesures sans contact extrêmement

■ ■ ■ précises et pour laquelle le savoir-faire de notre société est important. La capacité mesurée est proportionnelle à la hauteur de liquide dans le pot, une des électrodes de mesure est constituée par le capteur lui-même l'autre électrode est directement constituée par le plan d'eau sans aucun élément intermédiaire. Le grand avantage de cette technologie, outre sa remarquable précision, est donc que la mesure est effectuée directement par rapport à la référence et sans aucun contact avec elle. La mesure est ainsi directe et la référence non perturbée par un palpeur, un flotteur ou autre pièce ce qui est un gage de fiabilité et de robustesse. Le nivellement entre tous les points est directement calculé par un logiciel de traitement des mesures. Plusieurs modes de traitement peuvent être choisis par l'opérateurs pour calculer le nivellement : calcul par rapport à un capteur (dit point fixe) pris en référence, calcul par rapport au niveau moyen ou encore calcul par rapport à un plan défini par la mesure de trois capteurs.

Comme on le voit, le principe de cette technologie "antique" est extrêmement simple et le référentiel hydraulique avantageusement adapté à l'analyse de stabilité et au diagnostic de comportement d'ouvrage. Nous allons également montrer que la technique peut être remarquablement précise pour peu que l'on apporte quelques soins à la conception et à la réalisation du réseau hydraulique car n'oublions pas que c'est lui qui contient notre référence et donc de lui dont dépend la qualité et la précision du système.

En pratique trois pièges doivent être évités. Le premier concerne les bulles dans l'eau, celles-ci peuvent totalement obstruer la tuyauterie et donc la circulation d'un liquide. Pour les éviter il suffit de respecter certaines consignes de remplissage et d'employer un tube de diamètre supérieur à dix millimètres. Le second problème peut venir d'une différence de pression entre les pots de mesure qui se traduit inévitablement par des variations de hauteur d'eau dans les pots de mesure. Pour y remédier il suffit de mettre tout le circuit en équilibre de pression ce qui est facilement réalisable en reliant tous les pots par un tube d'air et de monter les capteurs de manière étanche sur les pots. Le dernier problème est lui directement lié au cheminement choisi pour les tuyaux d'eau. La surface libre du liquide qui matérialise la référence dans chacun des pots du circuit peut en effet être influencée par les parties non horizontales du circuit. Si des gradients de température apparaissent entre ces parties celles-ci engendrent des variations de masse spécifique de l'eau et donc des variations de hauteur dans les pots ou sont effectuées les mesures. Ces variations différentielles sont loin d'être négligeables quand l'on souhaite réaliser un nivellement de précision. Pour une température moyenne de l'eau du réseau de 20°C celles-ci seraient de 0,2 millimètres par mètre de colonne d'eau et par degré celsius. Les deux premiers pièges sont faciles à éviter et le dernier se résout en maintenant le réseau hydraulique dans un plan horizontal. Si cette dernière solution est très simple elle est parfois difficile à mettre en œuvre, on pourra alors équiper les parties non horizontales avec des capteurs de température afin de réaliser des corrections sur les mesures ou adopter des conceptions de circuit hydraulique circulant pour homogénéiser la température de l'eau.

Dans tous les cas, même si le choix pour la réalisation de l'une ou l'autre des installations est bien souvent guidé par une

contrainte d'environnement, une attention toute particulière doit être apportée à la conception et à la réalisation du réseau. A cette condition le nivellement hydrostatique devient alors un outil économique et de très haute précision pour diagnostiquer rapidement la stabilité et le comportement des ouvrages.

Mettre les ouvrages d'art sous surveillance informatique

Réaliser une construction tout en contrôlant la stabilité des ouvrages environnants, notre premier exemple concerne le contrôle de la stabilité d'un viaduc pendant la construction d'un parking.

Réalisé par la SENIM (Société d'Équipement de Nîmes et sa région) l'ouvrage à construire était un parking souterrain de 800 places sous trémies routières. D'une longueur totale de 200 m et d'une largeur de 30 m, il est

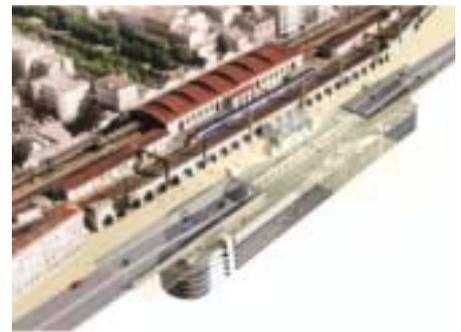


Figure 1 : Vue générale du parking et du viaduc SNCF

situé à 3 mètres de la façade du viaduc sud de la gare voyageur de Nîmes, parallèlement au bâtiment. La technique de construction employée est celle de la paroi moulée, ancrée dans le substratum étanche à -27m de profondeur, pour un dernier niveau de parking à -21m du terrain naturel.

La gare est elle composée de deux viaducs, un nord un sud, ancrés sur une couche de sistres très compacts située à deux mètres sous le terrain naturel. Pour contrôler la stabilité du viaduc sud pendant les travaux de construction et évaluer l'interaction viaduc/parking nous avons installé six capteurs HLS sur l'ouvrage. Quatre ont été répartis le long du chantier sur le viaduc sud (parking), un capteur a été fixé sur le viaduc sud mais côté nord afin de mesurer le gauchissement de l'ouvrage et le sixième capteur a été fixé de l'autre côté de la gare sur le viaduc nord côté nord. Ce sixième capteur positionné loin de la zone des travaux sera pris comme référence pour le calcul des nivellements.

Comme à l'accoutumé nous débutons les mesures avant le début des travaux afin d'enregistrer "l'état des lieux" du comportement de l'ouvrage. Pendant cette phase d'observation nous enregistrons très clairement les cycles journaliers de dilatation se

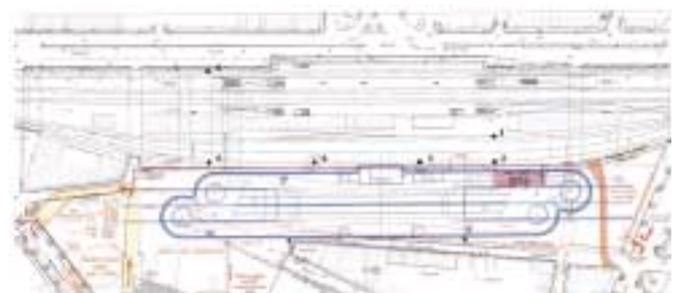


Figure 2 : Positionnement des capteurs HLS sur le viaduc

superposant sur une pente qui nous indique une très légère dérive de l'ouvrage. Celle-ci, parfaitement corrélée à l'augmentation des températures durant cette période estivale (juillet-août), nous en déduisons que nous sommes en train d'observer les effets thermiques saisonniers sur le comportement du viaduc. Nous remarquons également l'écartement des enregistrements de chaque capteur ce qui indique un léger gauchissement de cet ouvrage. Par curiosité, nous avons observé le tassement du viaduc sous chargement (arrêt d'un train en gare) pour constater qu'il était pratiquement négligeable.

L'exécution de la paroi moulée a débutée le 23 août, l'enregistrement en continu de cette phase est très intéressant car il montre parfaitement le tassement du viaduc et son basculement au fur et à mesure de l'avancement du forage et la réaction de l'ouvrage à la découpe de la couche de sistres.

Pour ce type de chantier, cette auscultation continue par capteur HLS permet de mettre facilement en œuvre la méthode dite "observationnelle" : définir la limite admissible de déformation, vérifier par calcul cette limite, ausculter en continu pour suivre les variations. Cette observation permet bien sûr de vérifier que l'on ne dépasse pas le seuil limite, mais est aussi une aide précieuse pour le maître d'œuvre qui peut ainsi suivre en temps réel l'impact de ses travaux sur les ouvrages environnants, fixer des seuils d'alertes et si besoin un seuil d'interven-

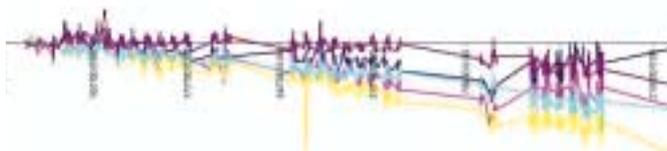


Figure 3 : Enregistrement du comportement du viaduc avant la réalisation de la paroi moulée

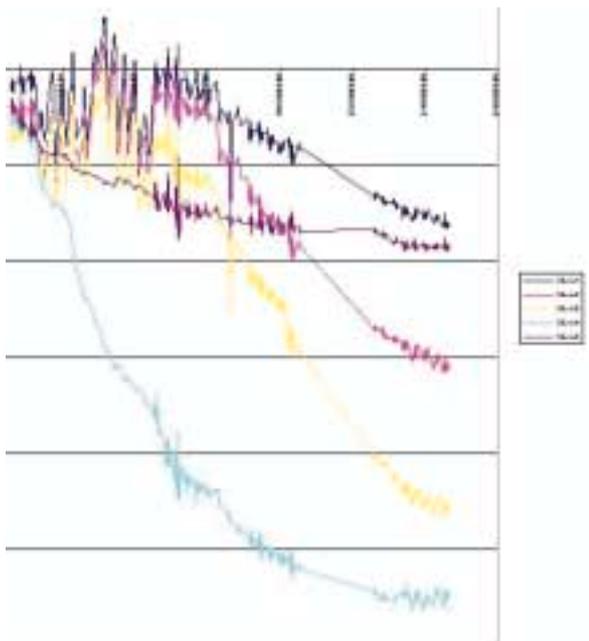


Figure 4 : Enregistrement du comportement du viaduc durant la réalisation de la paroi moulée face aux capteurs 3, 4 et 5

Le même type de contrôle est actuellement appliqué au suivi des déformations de la ligne ferroviaire Musée d'Orsay à Paris gare d'Austerlitz pendant la réhabilitation de l'immeuble

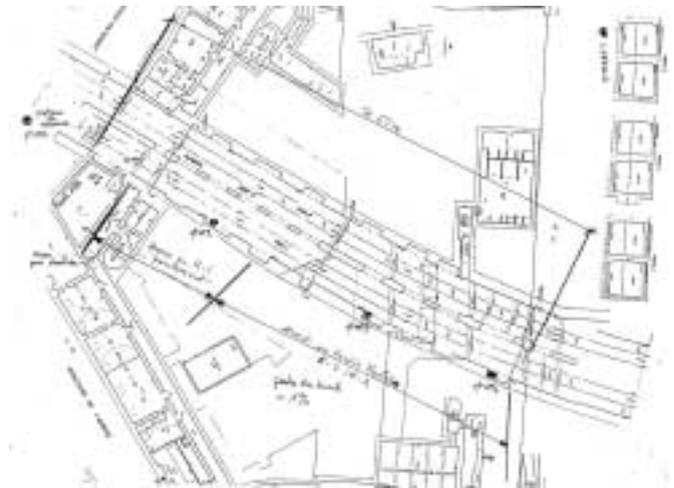


Figure 5 : Positionnement des capteurs HLS dans le tunnel

Point de mesure n°2

Valhubert. Pour cet exemple aussi le maître d'œuvre devra arrêter son chantier en cas de dépassement des valeurs prescrites au cahier des charges. En cas d'atteinte du seuil limite l'analyse des défaillances, (étape obligatoire avant toutes propositions des mesures à prendre pour la suppression des risques), peut s'avérer difficile si elle doit être réalisée à partir d'une auscultation ponctuelle réalisée par moyen topographique. Pour ne pas en arriver à ces extrémités la société COTEBA Management en sa qualité de maître d'œuvre nous a demandé d'ausculter et de suivre en continu le nivellement de la plate forme ferroviaire pendant toute la durée des travaux. Le tunnel ferroviaire a ainsi été équipé de quatre capteurs HLS fixés tous les vingt mètres sur ses parois ainsi que de capteurs de déplacements mesurant les éventuels mouvements différentiels entre le radier supportant le ballaste et les parois du tunnel.



Ici aussi les mesures effectuées avant le début des travaux permettent d'analyser l'état initial du tunnel et éventuellement de faire réviser les seuils fixés a priori. Une fois installée la mise en service du système commence toujours par la qualification de ses performances dans son environnement. On va ainsi mesurer le temps de retour à l'équilibre du système lors d'une

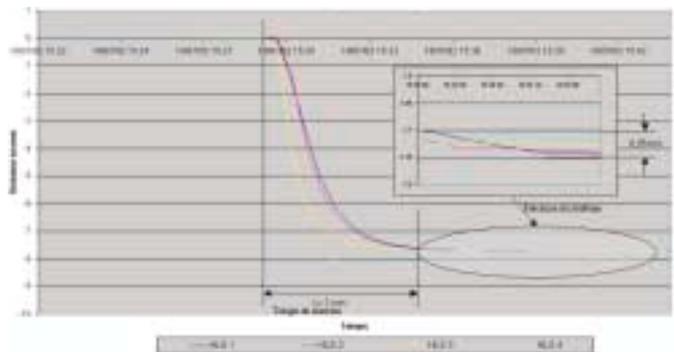


Figure 6 : mesures des performances du système



Stabilité d'un tunnel routier

sollicitation, celle-ci sera simulée par le déplacement d'un capteur et la précision du système qualifiée par l'écart des mesures par rapport au niveau moyen de chaque capteur entre l'équilibre initial et l'équilibre après sollicitation (figure 6).

Autre exemple d'application, le contrôle de stabilité d'un tunnel routier dans les Alpes. Ici, les données sont numérisées par la centrale d'acquisition installée sur l'ouvrage puis trans-

Etudier et caractériser le comportement d'un ouvrage existant

Exemple d'interaction sol/structure sur un grand bâtiment

Figure 7 : Caractérisation de la rigidité d'une dalle

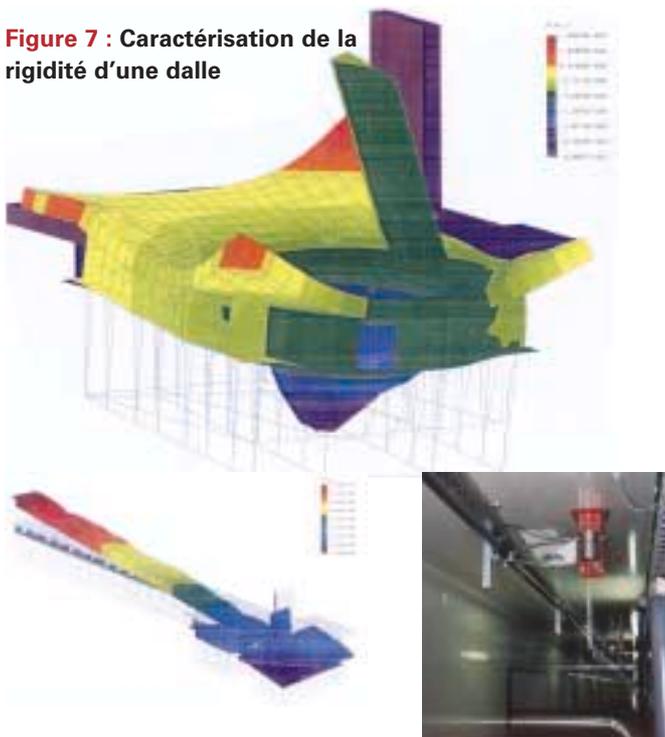


Figure 8 : Modèle de mouvement d'un bâtiment permettant de caractériser l'interaction sol/structure

Conclusion

Comme on a pu le voir, les applications des capteurs HLS sont multiples que se soit dans le domaine du génie civil ou de l'industrie. Idéal pour étudier et contrôler la stabilité d'un ouvrage dans sa globalité il s'avère un outil précieux du maître d'œuvre

pour suivre ses travaux. On peut encore citer quelques exemples non exhaustifs où ces capteurs ont fait leurs preuves : contrôle de stabilité de monument historique, contrôle de barrage, contrôle de radier des centrales nucléaires, mesure de taux de compression d'un sol, suivi de renforcement de sol, mesure de déformation d'un joint de construction et aussi stabilité de télescope, réglage de géométrie de rail, alignement de très grand laser et de grande machine, etc...

Perspectives de développement : le couplage modèle de mouvement / modèles numériques

Outre le développement de nouveaux capteur (extensomètre invar, extensomètre à fibre optique, fissuromètre, inclinomètre de forage, écartométrie à fil, etc...) et la réalisation d'une nouvelle centrale d'acquisition dotée de toutes les possibilités de communication évoluée nous nous intéressons aujourd'hui à une nouvelle approche associant étroitement et faisant interagir pertinemment le modèle de mouvement élaboré en continu par notre logiciel avec les modèles numériques de l'ouvrage considéré. Un outil de prédiction et de simulation évolué dont nous vous reparlerons prochainement. ●

Contacts

Patrick Leteurtre, Fogale Nanotech
 Frédéric Ossart, Fogale Nanotech

FOGALE Nanotech

Parc Kennedy - 285 rue Gilles Roberval - 30900 Nîmes
 Tel : 04 66 62 05 55 Fax : 04 66 62 71 60
 info@fogale.fr - www.fogale.fr

ABSTRACT

Surveying and controlling an infrastructure in order to detect any deformation, estimate its extent, its evolution, the deadline of repairs, those are today's stakes to guarantee the integrity of any civil engineered work, extend its life or reduce the cost of hazards linked to building procedures. To do so, the building administrator, the project manager and even the insurance company need to have at their disposal a pattern enabling them to visualize, understand and anticipate the infrastructure's behaviour and this from every angle. In response to this need, Fogale Nanotech has developed sensors and high accuracy instruments which elaborate a motion pattern enabling to diagnose the "state of health" of an infrastructure and predict any works drift. Among those sensors, HLS, hydrostatic levelling system is one of the main instruments as it provides accurate measurements allowing to control an infrastructure's global stability as well as separating overall motions from local ones in different parts of the building. We will base our demonstration on a few examples to show the input of the hydrostatic levelling system in the infrastructures' motions surveying and diagnosing strategy.

Keywords: works drift surveillance, stability, auscultation, anticipated servicing, hydrostatic levelling, HLS sensor.