



1
© SIXENSE

INSTRUMENTATION DES GRANDS OUVRAGES D'ART, DE RION-ANTIRION EN 2004 JUSQU'À 1915ÇANAKKALE EN 2021

AUTEURS : STÉPHANE JOYE, DIRECTEUR GÉNÉRAL ADJOINT, SIXENSE MONITORING -
MARCEL DEWIT, CHARGÉ D'AFFAIRE COMMERCIAL, SIXENSE MONITORING

LES GRANDS OUVRAGES D'ART SONT À LA POINTE DE LA TECHNOLOGIE. SOUMIS À DES ENVIRONNEMENTS CONTRAIGNANTS, PRÉVUS POUR DURER PLUS DE 100 ANS, ILS DOIVENT ÊTRE SUIVIS ET ENTRETENUS. LA SURVEILLANCE PAR UN SYSTÈME DE CAPTEURS PERMET D'OBTENIR DES INFORMATIONS ESSENTIELLES ET D'ANTICIPER LA MAINTENANCE EN RÉALISANT DES PRÉVISIONS DE VIEILLISSEMENT. DEPUIS UNE VINGTAINE D'ANNÉES, SIXENSE CONÇOIT ET INSTALLE DES SYSTÈMES DE SURVEILLANCE SPÉCIFIQUEMENT DÉDIÉS AUX OUVRAGES D'ART : ROBUSTES, PERFORMANTS ET D'UNE UTILISATION FACILE. REVUE DE 7 OUVRAGES EMBLÉMATIQUES DES 15 DERNIÈRES ANNÉES, SOUS SYSTÈME DE SURVEILLANCE SIXENSE.

SIXENSE ET ADVITAM
Depuis plus de 20 ans, Sixense réalise et installe des systèmes de surveillance sur les plus grands ouvrages d'art du monde. L'histoire commence en 2000 avec la création de la société Advitam,

qui sera ensuite intégrée à Sixense en 2014. Advitam est créée afin de réaliser la surveillance et le suivi des ruptures de fils des câbles de haubans et précontrainte. Le système d'acquisition versatile et performant créé pour

cet objectif permet rapidement à l'entreprise d'étendre le périmètre de la surveillance à tous types de capteurs pouvant être installés sur les infrastructures. Le système est particulièrement adapté pour intégrer les capteurs à

haute fréquence d'acquisition mesurant des vibrations structurelles (pièces de pont ou câbles). En parallèle de l'acquisition, un logiciel de gestion de l'ouvrage et de traitement des données acquises est développé : Scanprint, qui

1- Pont Yavuz Sultan Selim : Installation du système de surveillance sur le câble porteur.

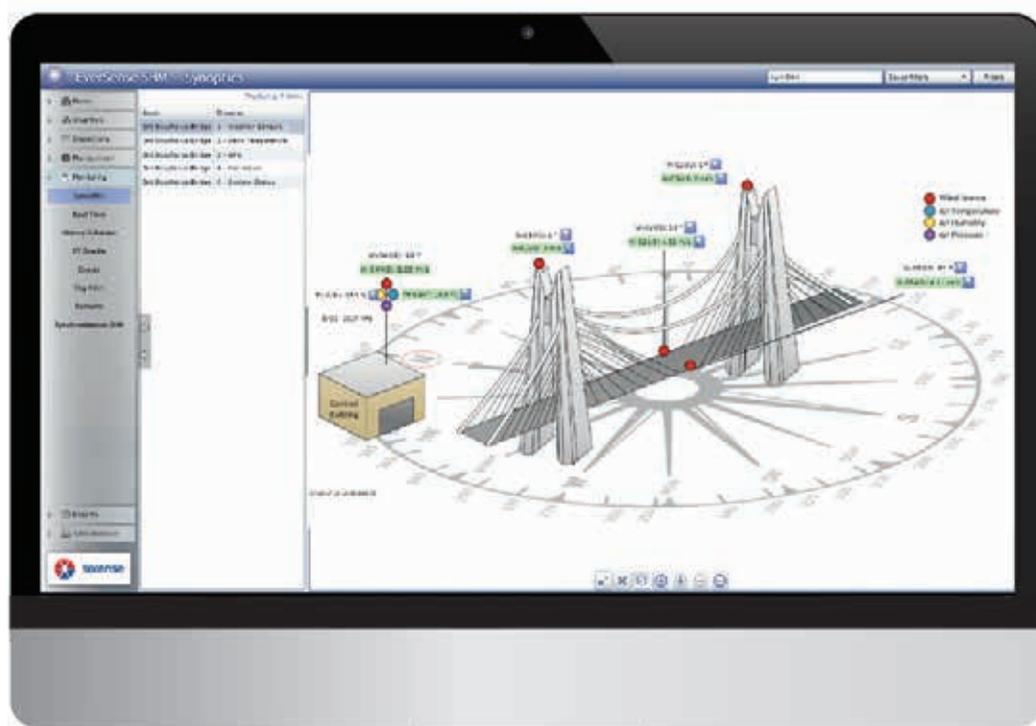
2- Système de Surveillance Sixense Eversense®.

3- Pont Charilaos Trikoupis (Rion-Antirion, Grèce).

1- Yavuz Sultan Selim Bridge: Installation of the monitoring system on the suspension cable.

2- Sixense Eversense® monitoring system.

3- Charilaos Trikoupis Bridge (Rion-Antirion, Greece).



2 © SIXENSE

deviendra EverSense. Ce logiciel permet autant de suivre les opérations de maintenance de l'ouvrage que de visualiser et comparer les données enregistrées par les capteurs. Il permet également de mettre en place des systèmes d'alerte informant l'exploitant lorsqu'une mesure dépasse un seuil prédéfini.

Sixense développe aussi des outils de mesure dédiés à l'auscultation des structures de précontrainte et à câble. Ces outils permettent par exemple la détection ultrasonore des fils endommagés au niveau des zones d'ancrage, la détection de vides d'injection dans les gaines, la mesure de tension d'éléments tendus (par ultrason ou méthode vibratoire) ou la mesure de précontrainte dans le béton par méthode de relâchement de contrainte.

Enfin, le logiciel Scanprint Eversense, dont un extrait est montré en figure 2, est étendu pour permettre la digitalisation des opérations d'inspection des ouvrages en permettant l'enregistrement de photographies, le repérage des défauts sur représentation digitale de l'ouvrage, ou encore la numérisation des manuels de maintenance.

Un des premiers ouvrages significatifs à bénéficier de ces outils de surveillance ou d'inspection est le pont Rion-Antirion (Charilaos Trikoupis) en Grèce en 2004.

PONT RION-ANTIRION (CHARILAOS TRIKOUPIIS, GRÈCE, 2004)

Fort d'une solution fiable et rendant un grand service aux entreprises d'explo-

tation, c'est en 2004 que Gefyra choisit Sixense (Advitam) pour mettre en œuvre une solution de gestion de son ouvrage et un système de surveillance adapté à cette infrastructure hors normes. L'ouvrage Charilaos Trikoupis (figure 3) est achevé en 2004 et franchit les 2 252 m du détroit de Corinthe à l'est, au niveau de la Ville de Patras. Cette région est à la fois sismique et soumise à des vents violents. Des contraintes qui ont conduit à une conception tout à fait innovante de l'ouvrage, avec un tablier stabilisé par des amortisseurs et soutenu par des pylônes en diamant à 4 jambes. Les piles des pylônes sont, quant à elles, lestées et mobiles au fond du détroit afin de se mouvoir en cas de séisme. Le système de surveillance

est tout aussi adapté à ces conditions exceptionnelles : il se concentre sur la mesure des vents et séismes ainsi que sur la réaction de l'ouvrage à de tels événements en prenant en compte la température générale de l'ouvrage, les vibrations du tablier et des haubans et les concentrations de contraintes dans les pylônes et le tablier.

Le système est toujours exploité par Gefyra depuis plus de 15 ans, ce qui en fait un des plus anciens systèmes de "Structural Health Monitoring" (SHM) encore en service.



3 © VINCI

LES PONTS SUSPENDUS DU FORTH ET DE LA SEVERN (ROYAUME-UNI, 2006)

En 2004, le pont autoroutier du Forth (construit en 1964 à Edimbourg) a été le premier pont suspendu en Europe à permettre l'ouverture de l'enveloppe de ses câbles porteurs pour une inspection visuelle. Des problèmes de corrosion y ont été observés. Ces découvertes ont amené le gestionnaire du pont à mettre en œuvre un système d'instrumentation acoustique permettant de suivre le processus de corrosion en quantifiant le nombre de ruptures de fils dues à la corrosion.

En 2006, Sixense a été sélectionné par Forth Estuary Transport Authority (FETA) pour la fourniture, l'installation, la mise en service et le traitement des données d'un système acoustique. Le système écoute en permanence les activités acoustiques dans les câbles porteurs à l'aide des capteurs acoustiques collés sur les colliers des suspentes. Ces colliers compactent les câbles constitués de 11 618 fils et transmettent parfaitement les événements acoustiques liés à des ruptures de fils dans les câbles. Comme l'évènement acoustique d'une rupture de fils est très spécifique, chaque donnée enregistrée par le système est analysée pour confirmer si cet événement est bien lié à une rupture de fils ou à un bruit ambiant. Peu après la mise en place de l'instrumentation, un système de déshumidification a été installé sur les câbles porteurs avec pour objectif de mettre fin au problème de corrosion. ▽



4

© FREYSSINET

Peu après, le pont sur la Severn (figure 4) et le pont Humber ont été traités de la même façon avec la mise en place par Sixense d'un système de surveillance acoustique de leurs câbles porteurs et haubans.

LES PONTS DU BOSPHORE (TURQUIE, 2007-2016)

Le détroit très stratégique du Bosphore, incrusté entre la Mer de Marmara et la Mer Noire, comporte aujourd'hui 3 ponts : le Pont des Martyrs du 15 juillet (premier pont), le Pont Fatih Sultan Mehmet (deuxième pont) et le

Pont Yavuz Sultan Selim (troisième pont, figure 5). Entre 2007 et 2016, ces trois ponts ont été instrumentés par Sixense. Le premier pont sur le Bosphore, d'une longueur de 1 074 m entre les pylônes, compte toujours parmi les 25 plus longs ponts suspendus au monde. Construit en 1973, il a la particularité d'avoir des suspentes diagonales (conçues également sur 3 autres ponts suspendus importants). Le système d'instrumentation composé de 168 capteurs a été installé en 2007 et a été opérationnel jusqu'au remplacement des suspentes en 2014.

4- Pont de la Severn, (UK).

5- Pont Yavuz Sultan Selim (Bosphore 3, Turquie).

4- Severn Bridge (UK).

5- Yavuz Sultan Selim Bridge (Bosphorus 3, Turkey).

Sur le deuxième pont du Bosphore, Sixense a été mandaté de 2009 à 2019 pour deux missions d'instrumentation et d'auscultations. La première mission consistait à mesurer la tension des boulons des colliers des suspentes sur les câbles porteurs. Cette mission a été exécutée par une méthode spécifique d'ultrason (Upus). La deuxième mission consistait en un système d'instrumentation en continu temporaire et qui a été maintenu en place pendant plusieurs années.

Enfin en 2016, Sixense a été sélectionné par le constructeur Hyundai/SK



5

© FRANCIS VIGOURoux

pour fournir, installer et mettre en service un système d'instrumentation sur le troisième pont sur le Bosphore (figure 1).

Le Pont Yavuz Sultan Selim (côté Mer Noire) est une structure hybride : il est à la fois suspendu et haubané. Il se distingue également par son originalité puisqu'aucun pont de ce genre n'a été construit dans le monde depuis le célèbre Pont de Brooklyn au 19^e siècle. Il bat également plusieurs records dans le domaine des ponts avec les pylônes les plus hauts (322 m), le tablier le plus large (59 m) et la plus longue portée de tablier haubané (1 408 m). Le système d'instrumentation intègre environ 130 capteurs de différents types (GPS, accéléromètres, capteurs de déplacements, inclinomètres, stations de météo et capteurs de contrainte). Seulement 10 mois séparaient la signature du contrat de la mise en service du système. Sixense s'occupe également de la maintenance du système.

PONT DE NORMANDIE (FRANCE, 2011)

Le Pont de Normandie est une référence française. Lors de sa mise en service en 1995, il détient le record mondial de portée avec 856 m entre les deux pylônes. Il est également à



6
© ALEXIS TOUREAN

**6- Pont de Normandie
(France).**

**7- Pont de Russky
(Russie).**

**6- Normandy Bridge
(France).**

**7- Russky Bridge
(Russia).**

l'origine de nombreuses innovations qui ont permis une réelle avancée technologique (aérodynamique de la structure, technologies des câbles de haubans). Quelques années après sa mise en service, cet ouvrage exceptionnel, soumis à des conditions environnementales exigeantes (vents, trafic), nécessite la mise en œuvre d'un système de surveillance afin de vérifier son évolution et d'anticiper les vieillissements prématurés. Ainsi, de 2011 à 2018, la Chambre de Commerce du Havre

a mandat Sixense pour instrumenter l'ouvrage, avec une attention particulière portée sur la surveillance des ruptures de fils des câbles de haubans. En complément de cette surveillance en continu, Sixense a pu mettre en œuvre un outil de mesure de l'état de dégradation des câbles de haubans au niveau des ancrages, avec l'évaluation de la corrosion et de la rupture des fils dans les ancrages (figure 6).

PONT DE L'ÎLE ROUSSKI (RUSSIE, 2013)

En 2012, s'achève la construction du plus long pont à haubans du monde permettant de relier l'île Rousski à la ville de Vladivostok, à l'extrême est de la Russie. L'ouvrage (figure 7) a une portée principale de 1 104 m.

Les haubans, avec 650 m de long, sont les plus grands haubans du monde. Une particularité qui les rend d'autant plus sensibles aux vibrations. Et même si d'imposants amortisseurs visent à limiter les vibrations des câbles, il est important de surveiller l'amplitude de mouvement potentiel. Encore une fois, Sixense est sélectionné pour sa connaissance particulière de la surveillance vibratoire et se voit confier l'instrumentation de la vibration des haubans de l'ouvrage. ▷



7
© FREYSSINET



8

© SIXENSE

PONT DE L'ÎLE DE RÉ (FRANCE, 2019)

Il n'a fallu que 20 mois, en 1988, pour construire le pont de 2926 m qui relie l'île de Ré à la ville de La Rochelle (figure 8). En 2018, le pont a connu une défaillance d'un de ses câbles de précontrainte externes. Le Département de la Charente-Maritime, maître d'ouvrage et propriétaire du pont, a confié à Sixense et Freyssinet la mission de sécuriser la structure, d'inspecter par ultrasons les ancrages des câbles existants, de surveiller acoustiquement leurs défaillances potentielles et de remplacer le câble rompu.

La technologie de surveillance acoustique EverSense® et le remplacement

du câble sont des compétences essentielles de Sixense et Freyssinet.

Toutefois, avant le viaduc de l'île de Ré, l'inspection ultrasonique Uscan® des ancrages n'avait été effectuée que sur des torons de câbles de haubans protégés individuellement, mais pas encore sur des torons nus de câbles de précontraintes en torons clairs injectés au coulis de ciment.

En précontrainte extérieure, le risque de défaillance se situe dans les premiers mètres après l'ancrage, plus loin que dans les câbles de haubans. Sixense et l'Université Gustave Eiffel (UGE, anciennement IFSTTAR) ont travaillé au développement de la technologie ultrasonique Uscan® afin de l'appliquer

8- Viaduc de l'île de Ré (France).

9- Pont de 1915Çanakkale (Turquie).

8- Île de Ré viaduct (France).

9- 1915Çanakkale Bridge (Turkey).

de sécuriser l'ouvrage par un état des lieux des ancrages et la surveillance continue des défaillances futures potentielles. Aujourd'hui, le pont de l'île de Ré continue d'être contrôlé par les équipes de Sixense afin de détecter de futures ruptures de fils.

LE PONT 1915ÇANAKKALE (DÉTROIT DES DARDANELLES, TURQUIE, 2020)

En Turquie, à 400 km au sud-ouest d'Istanbul, le détroit des Dardanelles est l'unique accès entre la Mer Noire et la Mer Méditerranée. C'est là, à proximité de la ville de Çanakkale (ancienne ville de Troie), que se construit le futur pont suspendu ayant la travée centrale

aux torons clairs injectés dans le coulis de ciment jusqu'à 2 m de l'ancrage. Pour ce projet, 85 ancrages ont été inspectés par Uscan® et plus de 250 capteurs acoustiques ont été installés afin



9

© SIXENSE

la plus longue du monde : le pont de 1915Çanakkale (figure 9).

Ce pont suspendu de 3563 m de long est composé de deux pylônes distants de 2023 m supportant un tablier de 45 m de large, par l'intermédiaire de 2 câbles porteurs et de ses suspentes.

L'ouvrage est réalisé par un consortium de 2 entreprises turques (Limak et Yapı Merkezi) et 2 entreprises sud-coréennes (DL E&C et SK ecoplant). Sixense a été sélectionné par ce consortium pour concevoir, fabriquer et installer un système d'instrumentation exceptionnel doté de plus de 1000 capteurs. Ces 1000 capteurs vont permettre de disposer d'une vision en continu des multiples comportements de l'ouvrage face aux sollicitations auquel il sera soumis. Ainsi, le système permettra de connaître notamment

les vibrations du tablier et des câbles, les concentrations de contraintes dans les éléments mécaniques, la température en différents points de l'ouvrage, les informations météo ou de sismique, ou encore la concentration du trafic sur l'ouvrage.

Mais bien plus qu'une visualisation des phénomènes, le système permettra de réaliser des prédictions de scénario en faisant varier les paramètres environnementaux de l'ouvrage. Ainsi, l'exploitant pourra estimer le vieillissement de l'ouvrage en fonction de ses prévisions d'augmentation du trafic.

CONCLUSION

Aux quatre coins du monde, des ouvrages exceptionnels sont construits pour désenclaver une région ou fluidifier le trafic international. Ces ouvrages font souvent la fierté d'une nation, notam-

ment par le défi technologique qu'ils relèvent. Comme pour un athlète de haut niveau, franchir d'un seul tenant des mers entières ou braver tempêtes et séismes nécessite une surveillance exigeante afin de conserver un état de santé au plus haut niveau. C'est bien l'objectif de la surveillance de santé structurelle des ouvrages (ou SHM : Structural Health Monitoring).

Ces ouvrages d'art exceptionnels sont la vitrine emblématique de l'activité SHM de Sixense qui réalise également au quotidien la surveillance de nombreux ouvrages plus modestes mais tout autant stratégiques pour les axes de communication et importants pour la sécurité des usagers.

Le tableau A donne les caractéristiques principales des ouvrages et de leur systèmes d'instrumentation décrits dans l'article.

Le vieillissement du parc d'infrastructures de beaucoup de pays comme la France est une préoccupation majeure à court terme et il faut tout mettre en œuvre pour éviter les catastrophes semblables à celles des effondrements du pont de Gênes en Italie ou de Mirepoix en France. L'enjeu des autorités, collectivités et gestionnaires d'ouvrage tout autant que des fournisseurs de systèmes de monitoring d'ouvrages, est de pouvoir équiper rapidement et à grande échelle les structures afin de prévenir les accidents.

De nombreuses initiatives voient le jour, notamment en France, avec l'appel à projets des "Ponts Connectés" du Cerema qui stimule l'innovation pour une application de cet objectif à court terme. Un appel à projets sur lequel Sixense a été retenu sur deux projets : IA2 et Viva. □

TABLEAU A : TABLEAU DES CARACTÉRISTIQUES DES OUVRAGES ET DE LEUR INSTRUMENTATION

	Pont Rion- Antirion	Pont de Forth	Pont de la Severn	Pont des Martyrs du 15 juillet (Bosphore 1)	Pont Fatih Sultan Mehmet (Bosphore 2)	Pont de Normandie	Pont de l'île Rousski	Pont Yavuz Sultan Selim (Bosphore 3)	Pont 1915Çanakkale
Date de mise en service de l'ouvrage	2004	1964	1966	1974	1988	1995	2012	2016	2022
Pays	Grèce	Angleterre	Angleterre	Turquie	Turquie	France	Russie	Turquie	Turquie
Type d'ouvrage	Haubané	Suspendu	Suspendu	Suspendu	Suspendu	Haubané	Haubané	Suspendu avec haubans	Suspendu
Nombre de pylônes	4 pylônes	2 pylônes	2 pylônes	2 pylônes	2 pylônes	2 pylônes	2 pylônes	2 pylônes	2 pylônes
Longueur totale	2880 m	1510 m	1598 m	1560 m	1090 m	2141 m	1885 m	1875 m	3563 m
Portée principale	3 x 560 m	/	988 m	1074 m	/	856 m	1104 m	1408 m	2023 m
Période d'instrumentation	2004-2021 (16 ans)	5 ans	2 ans	7 ans	/	2011- 2018 (7 ans)	2012-2021 (9 ans)	2016-2021 (5 ans)	/
Nombre de capteur	60	12	15	168	/	85	114	130	1080

© SIXENSE

ABSTRACT

INSTRUMENTATION OF LARGE ENGINEERING STRUCTURES, FROM RION-ANTIRION IN 2004 TO 1915ÇANAKKALE IN 2021

STÉPHANE JOYE, SIXENSE MONITORING - MARCEL DEWIT, SIXENSE MONITORING

Large engineering structures are exceptional infrastructure facilities defying constraining environments. They are built to last several decades. Their durability and user safety are major challenges which can only be met by constant monitoring of their state of health and regular maintenance. For more than 15 years Sixense has implemented rugged, autonomous monitoring systems, highly efficient and easy-to-use, especially suitable for this type of infrastructure. The latest innovations in signal processing make it possible to achieve behavioural predictions which are essential for maintenance scheduling by operators. These solutions are of fundamental importance for the structure owners, to avoid the disasters caused by ageing of the installed base of infrastructure worldwide. The article presents the benefits of the monitoring systems implemented by Sixense since 2004 via seven significant structures throughout the world. □

INSTRUMENTACIÓN DE GRANDES OBRAS DE FÁBRICA DE RION-ANTIRION EN 2004 A 1915ÇANAKKALE EN 2021

STÉPHANE JOYE, SIXENSE MONITORING - MARCEL DEWIT, SIXENSE MONITORING

Las grandes obras de fábrica son infraestructuras excepcionales pensadas para los entornos más exigentes y construidas para durar varias décadas. Su durabilidad y la seguridad de los usuarios son objetivos claves que solo pueden alcanzarse mediante un seguimiento continuo de su estado de salud y un mantenimiento periódico. Desde hace más de 15 años, Sixense instala sistemas de vigilancia robustos, autónomos, eficaces y fáciles de utilizar, especialmente adaptados a este tipo de infraestructuras. Las últimas innovaciones en materia de tratamiento de la señal permiten realizar previsiones de comportamiento, esenciales para planificar el mantenimiento por parte de los operadores. Estas soluciones son fundamentales para los propietarios de construcciones para evitar catástrofes provocadas por el envejecimiento del parque mundial de infraestructuras. El artículo presenta el interés de los sistemas de vigilancia instalados por Sixense desde 2004 a través de 7 obras significativas en distintos lugares del mundo. □