

# Projet SCaNING : Suivi des infrastructures neuves et existantes par Capteurs Noyés pour évaluer les Indicateurs Nécessaires à leur Gestion durable

Géraldine Villain<sup>1</sup>, Jean-Paul Balayssac<sup>2</sup>, Vincent Garnier<sup>3</sup>, Mehdi Sbartai<sup>4</sup>, Béatrice Yven<sup>5</sup>, Jean-Marie Hénault<sup>6</sup>, Xavier Dérobert<sup>1</sup>, Jean-François Chaix<sup>3</sup>, Vincent Le Cam<sup>1</sup>, Sérgio Palma-Lopes<sup>1</sup>, Odile Abraham<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Gustave Eiffel, Campus de Nantes, 44344 Bouguenais, France; [geraldine.villain@univ-eiffel.fr](mailto:geraldine.villain@univ-eiffel.fr)

<sup>2</sup> LMDC, Université de Toulouse, INSA/UPS, 31077 Toulouse, France; [balayssa@insa-toulouse.fr](mailto:balayssa@insa-toulouse.fr)

<sup>3</sup> Aix-Marseille Université, LMA, 13 100 Aix-en-Provence, France; [vincent.garnier@univ-amu.fr](mailto:vincent.garnier@univ-amu.fr)

<sup>4</sup> Université de Bordeaux, I2M, 33 405 Talence, France; [zoubir-mehdi.sbartai@u-bordeaux.fr](mailto:zoubir-mehdi.sbartai@u-bordeaux.fr)

<sup>5</sup> Andra, 92 298 Chatenay-Malabry, France; [beatrice.yven@andra.fr](mailto:beatrice.yven@andra.fr)

<sup>6</sup> EDF, R&D, PRISME, 78 400 Chatou, France; [jean-marie.henault@edf.fr](mailto:jean-marie.henault@edf.fr)

**RESUME** Pour une gestion durable et sûre des infrastructures de génie civil et pour en prolonger la durée d'exploitation, les gestionnaires d'ouvrages requièrent des informations qualifiées et quantitatives sur l'évolution continue des indicateurs de performance, en particulier, la résistance, le module, la porosité et la teneur en eau des bétons. Le projet ANR-SCaNING a pour objectif de développer une approche systémique du suivi de santé des structures neuves ou existantes en béton armé comprenant : la validation de capteurs noyés (électriques, électromagnétiques et ultrasonores), le traitement de la mesure et l'extraction d'observables qualifiées, découplées des principaux facteurs d'influence, la combinaison et la conversion des observables en indicateurs pour le diagnostic, ainsi que la plate-forme de supervision connectée.

**Mots-clefs** Capteur noyé, durabilité du béton, monitoring,

## I. INTRODUCTION

Les infrastructures de transport et de production d'énergie (ponts, tunnels, centrales nucléaires, sites de stockage de déchets radioactifs...) sont essentielles pour la mobilité des personnes et des marchandises, l'approvisionnement énergétique et le développement économique des territoires. Pour assurer leur maintenance, les inspections visuelles réglementaires restent aujourd'hui la norme [1]. Alors que les contrôles périodiques donnent une image de l'état de la structure, les capteurs installés en permanence peuvent révéler des changements rapides et/ou subtils dans le comportement de la structure grâce à des seuils d'alerte à définir avec soin [2,3]. Cette surveillance continue s'appuie sur des mesures locales plus ou moins sophistiquées (jauges ou surveillance acoustique), avantageusement complétées par des mesures globales [3-5]. Cependant à ce jour, il n'existe pas, à notre connaissance, de capteurs capables de fournir au gestionnaire des

informations sur l'évolution des indicateurs de performance et d'état des matériaux (résistance, modules d'élasticité, porosité et teneur en eau), alors que de tels indicateurs seraient utiles pour un diagnostic approfondi de la durabilité ou un recalcul de la durée de vie de l'infrastructure [6]. Ces 4 indicateurs sont en effet accessibles par une combinaison de trois types de méthodes d'évaluation non destructive (END) : ultrasonore, capacitive et résistive en les combinant [6,7].

Le projet ScaNING propose donc d'équiper les structures de capteurs embarqués qui fourniront des informations similaires à celles utilisées en END tout en permettant d'évaluer en continu les quatre indicateurs les plus pertinents pour le diagnostic et le pronostic d'une structure en béton armé : **la résistance à la compression, le module d'Young, la porosité et la teneur en eau**. Cette solution (capteurs de faible puissance et autonomes) est le meilleur moyen d'assurer une maintenance prédictive en garantissant aux gestionnaires des informations pertinentes, fiabilisées et disponibles en permanence.

## II. VERROUS SCIENTIFIQUES

Le système de surveillance qui sera conçu au cours du projet ScaNING combinera des capteurs intégrés et des END de surface, afin de bénéficier des avantages des deux approches : à cœur et en surface, locale et globale, en continu et ponctuelle. Il sera aussi comparé aux techniques les plus traditionnelles, qui serviront de référence. Les capteurs noyés présentent également l'intérêt de pouvoir étalonner donc de fiabiliser les END réalisées en surface de l'ouvrage à tout moment de sa vie, pour une cartographie quantitative de l'ensemble de la structure. Le projet ScaNING vise non seulement les nouvelles structures mais aussi les structures existantes, ce qui constitue une véritable innovation. Pour relever ce défi, nous proposons de dupliquer les démonstrateurs à l'échelle 1 : une maquette en béton pour les capteurs embarqués au moment de la coulée et une autre pour les capteurs scellés dans des réservations quelques mois plus tard.

Trois verrous scientifiques empêchant le déploiement massif de systèmes de surveillance de durabilité des structures nouvelles et anciennes sur plusieurs années ont été identifiés. Le 1<sup>er</sup> concerne la mise en œuvre et la sensibilité des capteurs noyés ainsi que l'extraction et la sensibilité des observables. Les technologies d'électrodes noyées déjà existantes seront utilisées pour les mesures de résistivité électrique [8,9]. Pour la méthode capacitive et les mesures US, un état de l'art révèle que l'utilisation de transducteurs intégrés est possible [10,11]. Le 2<sup>e</sup> verrou est lié au découplage des facteurs d'influence non désirés (biais environnementaux ou contraintes externes) et des observable [4,5]. Cette question clé sera étudiée par des tests en laboratoire, où les facteurs d'influence seront reproduits pour analyser leurs effets sur les observables. La 3<sup>e</sup> question concerne la conversion des observables en indicateurs basée sur une combinaison multi-physique à développer. Cette méthodologie de combinaison conviviale pour les ingénieurs, qui inclut des résultats de calibration, fournira les valeurs moyennes des indicateurs et leurs incertitudes.

## III. ORGANISATION DU PROJET

Le projet ScaNING est organisé en cinq groupes de travail transversaux. Le WP1 est consacré à la coordination et à la valorisation du projet. Les objectifs des quatre groupes de recherches et développements sont détaillés ci-dessous.

#### A. WP2 Conception de capteurs intégrés:

L'objectif du WP2 est de développer des systèmes de mesure à intégrer dans des structures en béton pour évaluer les indicateurs ciblés. Le WP2 sera organisé par type et physique de méthodes électromagnétique (EM) et ultrasonore (US) et électrique (résistivité). Cela permettra d'adapter les objectifs spécifiques selon le degré de développement des méthodes. Mais les principaux objectifs restent communs :

- concevoir les systèmes de mesure et les tester sur des échantillons de laboratoire ;
- les mettre en œuvre sur de grandes maquettes (ou démonstrateurs à l'échelle 1) ;
- comparer les mesures de surface avec celles effectuées par les systèmes noyés développés ;
- modéliser les propriétés des champs d'ondes pour les intégrer dans les traitements.

Après une étude numérique, la 1<sup>e</sup> étape consistera à valider la chaîne de mesure (génération, réception et traitement du signal) en mettant en œuvre un premier ensemble de capteurs dans des éprouvettes de béton. Pour les méthodes électriques, des capteurs noyés ont déjà été conçus pour les nouvelles structures de l'Andra [8] et utilisés dans le projet SCaNING. Pour les 3 techniques, la 2<sup>e</sup> étape consistera à valider les systèmes de capteurs optimisés dans les deux démonstrateurs du WP5. En outre, la résolution en profondeur, la résolution spatiale par rapport aux volumes étudiés par les différents systèmes de capteurs seront mises en cohérence [6].

#### B. WP3 : Extraction d'éléments observables en compensant les effets indésirables

Le but du WP3 est l'extraction d'observables découplées des facteurs d'influence. L'identification de ces facteurs (notamment la température), la surveillance complémentaire nécessaire et le traitement des données résultant de l'état de l'art du suivi de santé des structures (SHM) [2,4] seront mis en œuvre pour améliorer la qualité des observables. La 1<sup>e</sup> étape consistera à organiser la collecte des observables sur les échantillons et les démonstrateurs, en portant une attention particulière à la dérive éventuelle des capteurs. La 2<sup>e</sup> consistera à faire le point sur les méthodes de "nettoyage" des données pour les corriger des effets indésirables [2,4]. La 3<sup>e</sup> étape concerne la validation des corrections sur les données enregistrées pour obtenir les observables. Cela permettra de définir des lois de correction qui seront intégrées dans les processus de combinaison (WP4). En outre, la périodicité des mesures sera établie en lien avec l'évolution des conditions environnementales, afin d'optimiser le processus de sélection des données et la surveillance.

#### B. WP4 : Traitement de l'information pour l'évaluation des indicateurs

Le WP4 vise à développer une méthode de combinaison conviviale pour évaluer les indicateurs à partir des observables multi-physiques. L'originalité sera de prendre en compte les incertitudes des mesures, le couplage des observables complémentaires « nettoyées » et leurs modèles de conversion en indicateurs dans le processus de combinaison. Pour les obtenir, il faudra élaborer un protocole de calibration basé sur des carottes pour les structures nouvelles ou anciennes. Ensuite, sur la base des mesures en labo et des démonstrateurs, une comparaison des méthodes de combinaison sera organisée pour tester et évaluer la nouvelle méthode de combinaison multi-physique, les modèles basés sur l'intelligence artificielle [12], la fusion de données [6,7] et les outils en libre accès utilisés par EDF [www.openturns.org] par une analyse multi-critères. La définition d'un indice de qualité pour chaque méthode de combinaison permettra d'évaluer la confiance que l'ingénieur pourrait accorder aux résultats.

### B. WP5 : Conception des démonstrateurs

Le WP5 vise à construire deux démonstrateurs complets combinant des structures réelles (échelle 1) en béton armé, instrumentées par les trois types de systèmes de mesure par capteurs noyés (électriques, EM et US) et une plate-forme de données en accès libre pour comparer et combiner les trois systèmes appliqués à des structures identiques. Le premier démonstrateur correspond à des structures en béton armé nouvellement construites, avec des capteurs intégrés dans le béton frais. Le second, coulé à la même date, sera équipé des mêmes capteurs mis dans des réservations et scellés quelques mois plus tard.

La solution de supervision sera assurée par le logiciel générique STOCO, développé par l'Univ. Eiffel (IFSTTAR), qui sera configuré pour collecter les données provenant d'enregistreurs proches des démonstrateurs. Les principales fonctions qu'apporte STOCO sont la configuration à distance des différents capteurs, la visualisation des données, leur enregistrement dans une base dédiée à la collecte d'un grand nombre de données MongoDB, et leur traitement si besoin. Pour chaque type d'instrumentation, des briques matérielles spécifiques seront mises en œuvre soit en reliant les capteurs à une carte fille dédiée et à la carte mère générique PEGASE 3 de l'Univ. Eiffel (notamment pour les systèmes EM et US), soit en pilotant la sonde de résistivité [8] et le résistivimètre Syscal par un logiciel spécifique connecté à un PC. Une connectivité Wifi transférera les données de ce sous-système au superviseur central STOCO. En parallèle, 5 capteurs d'humidité et de température Honeywell (PT1000) seront noyés à différentes profondeurs afin de fournir des données complémentaires.

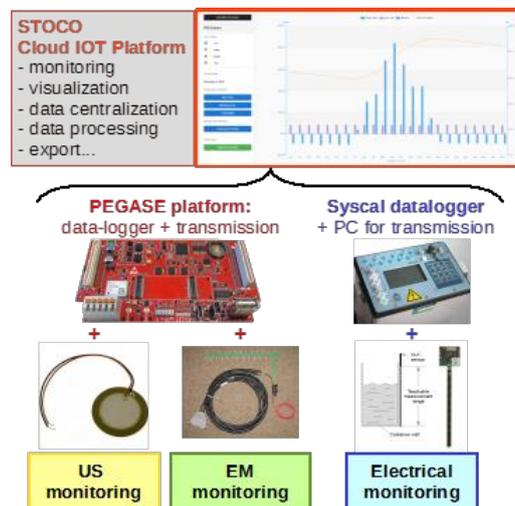


FIGURE 1. Conception du système de monitoring global

## IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif du projet ScaNING est donc de développer une approche systémique pour la surveillance de la santé des structures en béton nouvelles ou anciennes, y compris la validation des technologies de capteurs intégrés, le traitement des mesures et l'extraction d'observables qualifiés, découplés des facteurs d'influence, leur combinaison et conversion en indicateurs et l'interprétation de ces derniers. A l'issue du projet, après la valorisation des résultats, l'accès public gratuit à la base de données sera préparé et protégé par des licences Creative Commons.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Comité d'Évaluation Scientifique CES22 de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) d'avoir sélectionné en 2020 le projet SCaNING pour financement.

## REFERENCES

- [1] ITSEOA - Fascicule 3 : Auscultation, surveillance renforcée, haute surveillance, mesures [...], SETRA, 2011, [//www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/instruction-technique-surveillance-entretien-ouvrages-art-2](http://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/instruction-technique-surveillance-entretien-ouvrages-art-2)
- [2] Rütters H, Möller I, May F, et al. State-of-the-art of monitoring methods to evaluate CO2 storage site performance, CGS Europe report n°D3.3, Korre A, Stead R, Jensen NB (Eds), July 2013, 109p.
- [3] Biondini F., Frangopol D.M. (Eds), Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability: Proceedings of the Sixth International IABMAS Conference, Stresa, Lake Maggiore, Italy, 8-12 July 2012
- [4] Bayane I., Mankar A., Brühwiler E., Sørensen J.D., Quantification of traffic and temperature effects on the fatigue safety of a reinforced-concrete bridge deck based on monitoring data, Eng. Struct., 2019, 196:109357. [/10.1016/j.engstruct.2019.109357](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109357)
- [5] Crémone C, Santos J, Structural Health Monitoring as a Big-Data Problem, Structural Engineering International, 2018, 28(3):243-254. [/10.1080/10168664.2018.1461536](https://doi.org/10.1080/10168664.2018.1461536)
- [6] Balayssac J-P, Garnier V, Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures, Eds by Balayssac and Garnier, ISTE Press – Elsevier, Nov. 2017, 376p. ISBN: 9780081023051
- [7] Ploix MA, Garnier V, Breyse D, Moysan J, NDE data fusion to improve the evaluation of concrete structures, NDT & E International 44 (5), 442-448 [/10.1016/j.ndteint.2011.04.006](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.04.006)
- [8] Badr J, Fargier Y, Palma Lopes S, et al. Design and Validation of a Multi-Electrode Embedded Sensor to Monitor Resistivity Profiles over Depth in Concrete, Constr. Build. Mat., 2019, 223:310-321. [/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226)
- [9] Brameshuber W, Raupach M, Non-destructive Determination of the Water-Content in the Concrete Cover using the Multiring-Electrode, International Symposium (NDT-CE 2003), Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003,
- [10] Torres-Luque M, Osma J, Sanchez-Silva M, Bastidas-Arteaga E, Schoefs F, Chlordetect: Commercial Calcium Aluminate Based Conductimetric Sensor for Chloride Presence Detection, Sensors, 2017, 17, 2099-2118 [/10.3390/s17092099](https://doi.org/10.3390/s17092099)
- [11] Deraemaeker A., Dumoulin C., Embedding ultrasonic transducers in concrete: A lifelong monitoring technology, Constr. Build. Mat., 2019, 194:42-50. [/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.013](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.013)
- [12] Sbartai Z.M, Laurens S, Elachachi SM, Payan C. Concrete properties evaluation by statistical fusion of NDT techniques. Constr. Build. Mat., 2012, 37: 943-950