

SENSO « STRATEGIE D'EVALUATION NON DESTRUCTIVE POUR LA SURVEILLANCE DES OUVRAGES EN BETON »

G. Arliguie⁽¹⁾, S. Laurens⁽¹⁾, J.P. Balayssac⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Toulouse

Résumé

L'observation, la mesure, la simulation, la surveillance et l'intégration des données environnementales sont des éléments indispensables pour la gestion raisonnée et le développement durable de nos sociétés. Le projet SENSO s'inscrit dans cette logique : l'utilisation de techniques de mesure innovantes et l'exploitation des données obtenues avec pour objectif une gestion plus efficace du patrimoine bâti.

Ce projet a démarré en décembre 2005 grâce au soutien de l'ANR, programme RGCU. Il permettra entre autres de constituer des bases de données matériaux/propriétés, issues de l'ensemble des techniques, et d'exploiter ces données pour en optimiser l'utilisation.

Actuellement, les stratégies d'investigation conduisent souvent à accumuler les mesures sans que ces mesures soient réellement valorisées, soit parce que leur degré de signification est méconnu, soit parce qu'aucun parti n'est réellement tiré de la multiplicité des investigations. Le projet SENSO propose une approche innovante en génie civil en s'appuyant sur des méthodes et techniques d'analyse des données, pour valoriser les résultats des investigations (outils statistiques, réseaux de neurones, algorithmes génétiques).

Mots-clés

Evaluation non destructive - Ouvrages en béton - Fusion de données - Indicateurs de durabilité - Indicateurs pathologiques

1. INTRODUCTION

La nécessité de l'évaluation non destructive des constructions résulte de besoins croissants en matière de diagnostic pathologique, de requalification et de prédiction de la durée de vie des structures.

Les principaux enjeux scientifiques et techniques du projet SENSO ont trait à la *methodologie de l'auscultation* des ouvrages en béton, depuis l'acquisition de données pertinentes in situ jusqu'au traitement et à l'analyse de ces données dans le but d'en extraire des *informations fiables et utiles*.

Les stratégies d'investigation usuelles conduisent souvent à accumuler les mesures sans que ces mesures soient réellement valorisées, soit parce que leur degré de signification est méconnu (nombreuses sources d'incertitude, non prise en compte de la variabilité intrinsèque ou héritée des propriétés), soit parce qu'aucun parti n'est réellement tiré de la multiplicité des investigations, les mesures étant plus « juxtaposées » que réellement exploitées en combinaison.

Afin de valoriser les résultats des investigations in situ, SENSO propose une nouvelle approche de l'acquisition, du traitement et de l'analyse des données d'auscultation en génie civil. Outre **l'amélioration des connaissances** sur les phénomènes physiques relatifs aux différentes technologies éprouvées, cette approche mettra l'accent sur la **combinaison des techniques** et sur l'utilisation de méthodes innovantes en matière d'analyse de données expérimentales : fusion de données, logique floue, réseaux de neurones artificiels...

La fiabilisation du diagnostic par une meilleure exploitation des outils d'END et l'anticipation sur la dégradation des ouvrages représentent un enjeu économique majeur en terme de gestion rationnelle du patrimoine bâti. De plus, une meilleure pratique de l'évaluation non destructive se traduirait également par une réduction des coûts liés à l'immobilisation des structures.

Sur le plan industriel, le développement des connaissances sur les outils existants, associé à de nouvelles approches méthodologiques du traitement et de l'analyse des données d'auscultation doit conduire à de nouvelles solutions techniques non destructives permettant l'évaluation et la surveillance des ouvrages en béton.

2. LES ACTIONS DE RECHERCHE

Il est possible de classer les informations issues de l'auscultation en deux catégories interdépendantes :

- les indicateurs pathologiques ;
- les indicateurs de durabilité (mécanique et physique).

Les objectifs du projet SENSO se concentreront sur l'évaluation quantitative et non destructive, in situ, des principaux indicateurs : porosité, teneur en eau, teneur en chlorures, rigidité, résistance mécanique, indicateur de macro-fissuration, propriétés de transfert, front de carbonatation.

Pour chaque indicateur, les objectifs sont les suivants : évaluer sa valeur (caractéristiques moyennes et degré de variabilité) et estimer en parallèle le **degré de fiabilité** de cette évaluation. Pour répondre à ces objectifs, les voies d'action seront :

- l'amélioration des techniques de mesure (soit par des développements techniques – qui demeureront cependant mineurs, soit par une meilleure connaissance, grâce à un travail de modélisation et de simulation des phénomènes physiques impliqués dans la mesure) pour en étendre le domaine d'utilisation et en améliorer la précision,
- l'acquisition d'ensembles de données expérimentales relatives au matériau dans le périmètre de l'étude,
- l'application, innovante en génie civil, de méthodes d'analyse des données, pour mieux valoriser l'ensemble des données recueillies,

- l'établissement de protocoles d'évaluation, de la mesure au diagnostic, conçus pour la mise en œuvre sur des ouvrages existants et validés sur de tels ouvrages.

2.1 Les techniques d'investigation

Les techniques suivantes seront éprouvées et développées dans le cadre du projet :

- prospection électromagnétique (radar),
- prospection acoustique (ultrasons),
- prospection électrique – résistivité,
- thermographie infra-rouge,
- mesures capacitives.

2.2 Phase expérimentale : campagnes de mesures sur échantillons et sur ouvrages

Les campagnes expérimentales seront réalisées d'une part sur des corps d'épreuve et des maquettes confectionnés en laboratoire selon un cahier des charges spécifique à ce projet, et d'autre part sur des ouvrages réels.

2.3 Phase de modélisation et d'analyse des données

Cette étape a pour but l'amélioration de l'interprétation des mesures, la réduction des incertitudes épistémiques, et la quantification des incertitudes stochastiques.

2.4 Phase de validation et d'exploitation

La dernière phase consistera en une validation en aveugle in situ, sur des ouvrages réels.

3. PHASE EXPERIMENTALE

3.1 Campagne de mesures en laboratoire

Elle est prévue sur une gamme de bétons représentatifs dans le but d'établir un ensemble de *relations empiriques entre mesures non destructives et indicateurs*. Le béton sera considéré à ce stade comme un matériau homogène. Lors de cette campagne, des *essais croisés* seront réalisés par l'ensemble des partenaires sur les mêmes corps d'épreuves dans l'optique de la fusion de données.

On prévoit de réaliser tout d'abord des **corps d'épreuve** placés en ambiance de laboratoire. L'objectif est de contrôler les indicateurs visés par des méthodes d'investigation classiques et de déterminer des lois de calage entre les grandeurs mesurées par des techniques non destructives et ces indicateurs. La gamme des bétons analysés doit couvrir une plage de porosité suffisamment étendue pour être représentative de ce qui est classiquement rencontré sur les ouvrages (typiquement dans la gamme $f_{c28} = [25 - 50]$ MPa).

Des corps d'épreuve présentant des défauts (fissures) et des gradients de propriétés physiques ou mécaniques seront réalisés dans un second temps.

On concevra également des **maquettes** conservées à l'extérieur, exposées dans des conditions proches des ouvrages réels et comportant un ferrailage (certaines zones pouvant en être exemptes pour pouvoir effectuer des prélèvements par

exemple). L'objectif de ces essais situés à mi-chemin entre les essais sur corps d'épreuve et les campagnes sur sites est multiple :

- validation des essais réalisés dans des conditions parfaitement contrôlées, définies précédemment, sur des éléments en vraie grandeur,
- maîtrise des données initiales sur les caractéristiques du béton et sur la position du ferrailage, ce qui n'est pas toujours le cas sur site,
- possibilité de procéder à tous les essais destructifs nécessaires pour recalage au moment des mesures, ce qui ne sera jamais le cas sur ouvrages,
- possibilité d'instrumentation de la maquette au moment de la fabrication (capteurs pour mesures d'humidité interne par exemple).

Une meilleure connaissance des incertitudes stochastiques et épistémiques favorisera leur prise en compte afin d'améliorer *la fiabilité des mesures* et par voie de conséquence l'évaluation des indicateurs de durabilité.

Sensibilité des techniques et réduction des incertitudes épistémiques au laboratoire

Il s'agit de définir la sensibilité des techniques et de prendre en compte les erreurs systématiques qui peuvent être faites lors de la mesure. Pour cela deux approches sont envisagées :

- les relations entre les indicateurs recherchés et les grandeurs mesurées (principalement issues du CND, éventuellement complétées de mesures plus courantes). Il s'agira ici de quantifier et de formaliser la sensibilité et la précision des mesures aux paramètres d'influence ;
- les corrélations entre les mesures obtenues via les différentes techniques. Ces corrélations pourront ensuite être utilisées pour réduire les incertitudes.

Quantification des incertitudes stochastiques au laboratoire

L'objectif est de quantifier les incertitudes liées aux différentes variabilités pouvant modifier la mesure et en particulier celles qui peuvent être attribuées au matériau lui-même. Il s'agira donc de quantifier la variabilité stochastique des mesures.

3.2 Campagne d'essais sur site

On procédera au choix de plusieurs ouvrages sains et pathologiques et à la mise en œuvre d'une campagne expérimentale en place.

Cette phase vise à :

- mesurer et quantifier la variabilité des mesures pour les différentes techniques employées,
- prélever des échantillons et pratiquer des essais de contrôle, afin de quantifier au mieux les propriétés (indicateurs) et leur variabilité,
- documenter une base de données combinant les mesures de CND et les indicateurs.

On séparera la variabilité spatiale (gradients), qui constitue l'objet même de l'évaluation de l'ouvrage, de la variabilité irréductible (bruit, incertitude) qui conditionne la qualité de cette évaluation.

Dans l'ensemble de cette phase expérimentale, les données sont recueillies et une exploitation immédiate en est faite (relations empiriques, corrélations, mesures de variance). C'est au cours de la phase suivante que la valorisation sera entreprise.

4. PHASE DE MODELISATION ET D'ANALYSE DE DONNEES

- 4.1 La modélisation physique des processus de mesure a pour but de contribuer :
- (a) à l'amélioration de la qualité des mesures,
 - (b) à l'amélioration de l'estimation des propriétés.

La compréhension de la physique des phénomènes liés aux différentes techniques d'END permet de mieux exploiter les mesures dans une logique de *problème inverse couplé*. On s'appuiera sur la modélisation directe pour mettre au point des dispositifs expérimentaux plus adéquats, améliorer les procédures expérimentales. La séparation des influences des différentes variables expérimentales ou de matériaux sur les paramètres mesurés peut également s'appuyer sur la modélisation.

On envisage ainsi de progresser :

- dans la connaissance des couplages matériau-capteurs,
- dans *l'interprétation des mesures* : par exemple, la mise en évidence des gradients de propriétés perpendiculaires à la surface et leur influence sur les mesures.

- 4.2 L'analyse des données sera utilisée pour réduire les incertitudes épistémiques et quantifier les incertitudes stochastiques. Il s'agira ici d'exploiter au mieux et de valoriser l'ensemble des données, relations et corrélations établies dans les phases précédentes.

L'innovation scientifique consistera à mettre en œuvre des techniques d'analyse capables de tenir compte des résultats obtenus précédemment, soit :

- de la sensibilité de chaque mesure à chaque propriété,
- de l'incertitude d'estimation attachée à chacune des propriétés,
- des limites des méthodes actuelles.

La principale méthode envisagée est la *fusion de données*. La fusion de données a un triple but : améliorer la performance d'un système de mesure malgré les limitations physiques des techniques, utiliser des données provenant de plusieurs sources et maîtriser la démarche expérimentale générale. Elle permet de tirer partie d'informations issues de plusieurs techniques ou de plusieurs conditions expérimentales. Enfin elle propose une gestion de l'incertain notamment lorsqu'il y a conflit entre plusieurs sources d'informations.

Le traitement et l'analyse des données d'auscultation pourront également faire appel à l'analyse statistique multivariable (ACP) et à des outils de modélisation statistique non paramétrique tels que les réseaux de neurones artificiels.

Les résultats attendus sont :

- l'exploitation de l'ensemble des données obtenues sur les ouvrages pour établir les corrélations entre mesures et propriétés et valider (ou pas) les corrélations établies au laboratoire,
- la mise au point des algorithmes d'analyse et de traitement des données qui permettront d'estimer les indicateurs (propriétés moyennes, variabilité, degré de confiance ou précision de l'estimation). Les apports d'informations additionnelles (« a priori » déduits de la connaissance de l'ouvrage et de son histoire) seront quantifiés (on analysera la manière dont ces informations peuvent aider à réduire les incertitudes).

5. PHASE DE VALIDATION ET D'EXPLOITATION

Cette phase correspond à un retour d'expérience sur ouvrages.

Il sera procédé au choix d'un ou deux ouvrages de référence sur lesquels des auscultations sont programmées par le gestionnaire. L'objectif de cette partie est double :

- il s'agit tout d'abord de **valider en conditions réelles** les développements réalisés en laboratoire et sur sites tests (calibration, fusion de données). Les mesures seront alors réalisées totalement en aveugle sur des zones préalablement fixées par le gestionnaire de l'ouvrage. En parallèle des essais non destructifs, des prélèvements seront également réalisés de façon à évaluer par des mesures classiques les propriétés recherchées.
- les indicateurs de durabilité évalués seront assortis d'un intervalle de confiance, afin de fournir aux calculateurs un ensemble de données utiles pour établir un diagnostic complet de l'état de l'ouvrage et le replacer dans son cycle de vie.

9. CONCLUSIONS

Au terme du projet et dans l'année qui suivra, des *protocoles d'évaluation* seront rédigés pour valoriser l'ensemble du travail accompli, en particulier les développements en traitement et fusion des données. On s'attachera à produire des éléments directement utilisables par les différents acteurs de la profession, par exemple des *guides techniques pour un meilleur usage de l'évaluation non destructive* ou bien des logiciels pour une mise en œuvre pratique de la fusion de données.

SENSO est un projet soutenu par l'ANR, appel d'offres RGCU.