

# ÉVALUATION DE L'ÉTAT DES OUVRAGES EN BÉTON PAR COMBINAISON DE TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES *EVALUATION OF CONCRETE STRUCTURES BY COMBINING NON DESTRUCTIVE TESTING METHODS*

J.P. Balayssac<sup>(1)</sup>, S. Laurens<sup>(1)</sup>, G. Arliguie<sup>(1)</sup>,  
M.A. Ploix<sup>(2)</sup>, D. Breyse<sup>(3)</sup>, B. Piwakowski<sup>(4)</sup>, G. Villain<sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> Université de Toulouse ; UPS, INSA ; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des  
Constructions) ; 135, avenue de Rangueil ; F-31 077 Toulouse Cedex 04, France

<sup>(2)</sup> LCND Université de la Méditerranée, IUT d'Aix en Provence

<sup>(3)</sup> GHYMAC Université Bordeaux 1

<sup>(4)</sup> Groupe Electronique-Acoustique, Ecole Centrale de Lille

<sup>(5)</sup> LCPC de Nantes

## **Résumé**

Dans une perspective de développement durable, la mise en place d'une procédure de gestion et d'entretien du patrimoine bâti devient une des préoccupations essentielles des maîtres d'ouvrages de Génie Civil. Dans ce contexte, le projet SENSO (Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton) a pour objectif de définir des méthodologies d'auscultation non destructive des structures en s'appuyant sur une approche multi-techniques. La démarche consiste tout d'abord à définir les bases théoriques de cette méthodologie sur des maquettes reproduisant les pathologies les plus rencontrées sur ouvrages. Le but est de définir la sensibilité des techniques, la variabilité de l'évaluation, et des méthodologies de valorisation des mesures. La valorisation des mesures issues de l'utilisation combinée des techniques s'appuie sur la fusion de données, en développant un outil qui soit ensuite transposable aux ouvrages réels. Cette communication présente la stratégie mise en place et les premiers résultats obtenus en laboratoire pour l'évaluation non destructive des indicateurs visés, pour la caractérisation et la prise en compte de la variabilité des mesures et pour la fusion des données.

## **Abstract**

*In the context of sustainable development, the establishment of a procedure for the management and maintenance of the built heritage is one of the main interest for the owners of Civil Engineering structures. In this context, SENSO project (Strategy of non destructive evaluation for the monitoring of concrete structures) aims to develop methodologies for non-destructive testing of structures based on a multi-techniques approach. The approach is first to define the theoretical basis of this methodology on models able to reproduce the usual pathologies. The aim is to define the sensitivity of the techniques, the variability of the evaluation, and the methodologies for the enhancement of the measurements. The enhancement of measurements resulting from the combined use of techniques is based on data fusion, by developing a tool able to be used on real structures. This communication presents the strategy carried out and the first results obtained for non destructive evaluation of the indicators. It also emphasizes how the variability of measurements can be taken into account and how data fusion can be used for the evaluation of indicators.*

## 1. INTRODUCTION

Cette communication vise à présenter les travaux de recherche réalisés dans le cadre d'un projet soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche, le projet SENSO. L'acronyme SENSO signifie « Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton ». Ce projet de trois ans doit se terminer à la fin de l'année 2008. Il regroupe plusieurs partenaires spécialisés soit en développement de techniques non destructives, soit en expertise d'ouvrages, ou bien en traitement de données.

La nécessité de l'évaluation non destructive des constructions résulte de besoins croissants en matière de diagnostic pathologique et de requalification des structures. Pourtant, même si on dispose d'un important panel de méthodes non destructives potentiellement efficaces pour la caractérisation de l'état du matériau, le lien entre les observables issues de la mesure et les indicateurs d'état du matériau n'est pas clairement défini. Il existe plusieurs raisons à cela, la forte variabilité du matériau, les effets couplés des indicateurs, la difficulté du passage du laboratoire au site.

Les principaux enjeux scientifiques et techniques du projet SENSO ont trait à la méthodologie 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.

Pour cela, plusieurs verrous scientifiques doivent être levés, en particulier dans le domaine de l'analyse des données. 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.

Les données issues de l'auscultation peuvent être classées en deux catégories d'indicateurs par ailleurs interdépendantes :

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

La première catégorie rassemble les grandeurs qui fournissent une information sur l'état actuel de l'ouvrage, relativement aux exigences de performance qu'il doit satisfaire. Connaître leur valeur permet soit d'évaluer directement le niveau de performance de l'ouvrage, soit de mieux connaître les mécanismes par lesquels les performances se dégradent. La deuxième catégorie rassemble des indicateurs dont la connaissance permet d'estimer l'évolution future de l'ouvrage, et donc les durées de service résiduelles. Ces indicateurs alimentent par exemple les modèles de re-calcul et, combinés aux indicateurs pathologiques, ils permettent de situer l'ouvrage sur son cycle de vie.

L'objectif du projet SENSO est de proposer une méthodologie d'évaluation non destructive de certains de ces indicateurs. Les indicateurs retenus sont :

- la porosité,
- le module d'Young,
- la résistance en compression,
- la teneur en eau,
- la teneur en ions chlorures,
- la perméabilité,
- la profondeur de carbonatation,
- la profondeur de macro-fissuration.

Pour chaque indicateur, les objectifs sont, d'évaluer sa valeur (caractéristiques moyennes et degré de variabilité) et d'estimer en parallèle le degré de fiabilité de cette évaluation. Afin de valoriser les résultats des investigations in situ, SENSO vise donc à proposer une nouvelle approche de l'acquisition, du traitement et de l'analyse des données d'auscultation en génie civil.

Pour répondre à cet objectif, on s'attache tout d'abord à améliorer les techniques de mesure pour en étendre le domaine d'utilisation et en améliorer la précision. Des campagnes expérimentales relatives au matériau dans le périmètre de l'étude, sur des corps d'épreuve de laboratoires avec une variation homogène ou hétérogène des indicateurs est mise en place afin de relier les observables issues de la mesure aux indicateurs visés. Ces campagnes expérimentales sont également étendues à des ouvrages réels. Des méthodes d'analyse innovantes en génie civil (fusion de données, réseaux de neurones) sont mises en œuvre pour mieux valoriser les données recueillies. Enfin dans une phase finale on proposera des protocoles d'évaluation, de la mesure au diagnostic, conçus pour la mise en œuvre sur des ouvrages existants et validés sur de tels ouvrages.

Les résultats présentés dans cette communication concernent uniquement la première partie du projet, la phase expérimentale réalisée sur corps d'épreuve de laboratoire.

## **2. STRATEGIE MISE EN ŒUVRE DANS SENSO**

Le partenariat mis en place implique des partenaires publics (CDGA de Bordeaux, IEMN de Lille, LCND d'Aix, LCPC de Nantes, LEAT Sophia Antipolis, LMDC de Toulouse, ONERA Toulouse) et privés (EDF Ceidre, EXAM-BTP, GETEC, Port Autonome de Nantes Saint Nazaire, SOVEP). Les techniques suivantes sont utilisées dans le cadre du projet :

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

### **2.1. PHASE EXPERIMENTALE : CAMPAGNES DE MESURES SUR ECHANTILLONS ET SUR OUVRAGES**

#### **2.1.1. Campagne d'essais de laboratoire**

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

On a tout d'abord réalisé un ensemble de 135 dalles mettant en œuvre 8 compositions de béton différentes. La gamme des bétons analysés couvre une plage de porosité suffisamment étendue pour être représentative de ce qui est classiquement rencontré sur les ouvrages (typiquement dans la gamme  $fc28 = [25 - 60]$  MPa). Les propriétés du matériau en relation avec les indicateurs visés (teneur en eau, en chlorures) sont homogénéisées. 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. Cette campagne est découpée en trois tranches. Une première est destinée à la caractérisation des indicateurs, porosité, teneur en eau, module d'Young et résistance en compression. Une seconde est destinée à la caractérisation de la

carbonatation. Enfin la dernière est dédiée à la caractérisation des chlorures. Le corpus de test a été bâti afin de pouvoir quantifier les différents types de variabilité expérimentale (à l'échelle du point de mesure, de l'éprouvette ou de la gâchée).

Des maquettes conservées à l'extérieur, exposées dans des conditions proches des ouvrages réels et comportant un ferrailage (certaines zones en étant exemptes pour pouvoir effectuer des prélèvements par exemple) sont également prévues. Elles présenteront des gradients de propriétés physiques telles que (teneur en eau par exemple) et des fissures. Huit maquettes sont prévues et seront confectionnées avec des bétons identiques à ceux utilisés pour les corps d'épreuve homogènes. L'objectif de ces essais situés à mi-chemin entre les essais sur corps d'épreuve et les campagnes sur sites est multiple. Il s'agit tout d'abord de valider des essais réalisés dans des conditions parfaitement contrôlées définies précédemment, sur des éléments en vraie grandeur, tout en maîtrisant des données initiales sur les caractéristiques du béton et sur la position du ferrailage, ce qui n'est pas toujours le cas sur site. En outre il sera possible de procéder à tous les essais destructifs nécessaires pour recalage au moment des mesures, ce qui ne sera jamais le cas sur ouvrages, ainsi qu'à une instrumentation de la maquette au moment de la fabrication (capteurs pour mesures d'humidité interne par exemple).

### 2.1.2. Campagne d'essais sur sites

Deux ouvrages ont été investigués, il s'agit d'un terminal du Port Autonome de Nantes Saint Nazaire et de murs de la base sous marine de Bordeaux. Sur ces deux ouvrages il s'est agi de mettre en œuvre l'ensemble des techniques sur une zone de mesure délimitée où les indicateurs sont également mesurés par des méthodes destructives. Ces essais visent également à quantifier sur site la variabilité des mesures.

## 2.2. ANALYSE ET VALORISATION DES DONNEES

Il s'agit ici d'exploiter au mieux et de valoriser l'ensemble des données et d'établir des relations et corrélations entre observables issues de la mesure et indicateurs.

L'innovation scientifique consiste à mettre en œuvre des techniques d'analyse innovantes (en génie civil), 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 font également appel à l'analyse statistique multivariable (ACP) et à des outils de modélisation statistique non paramétrique tels que les réseaux de neurones artificiels. Ces outils permettent, sur la base de l'apprentissage des relations mesures/indicateurs (en s'appuyant sur la base de connaissances qui rassemble les données expérimentales), d'établir un ensemble de relations statistiques, puis de déduire les valeurs des indicateurs correspondant à un ensemble de mesures donné (une telle approche ne repose pas sur une modélisation physique des processus et ne nécessite a priori aucune connaissance sur les phénomènes en jeu).

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).

D'un point de vue opérationnel, on proposera :

- des programmes d'investigation, conçus pour répondre à des objectifs précis (obtenir la valeur d'indicateurs donnés, à un niveau de confiance donné),
- des procédures éventuelles de correction des mesures et d'interprétation en situation opérationnelle, en précisant leur validité.

### 2.3. PHASE DE VALIDATION ET D'EXPLOITATION

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

- 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.
- il faut ensuite assortir les indicateurs de durabilité évalués 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.

Cette phase de validation doit permettre d'aboutir à la proposition d'une méthodologie d'investigation des ouvrages intégrant l'ensemble de la démarche décrite ci-dessus.

## 3. PHASE EXPERIMENTALE SUR CORPS D'EPREUVE

### 3.1. PRESENTATION ET RESULTATS DES CARACTERISATIONS DESTRUCTIVES ET NON DESTRUCTIVES

Au moment de la rédaction de cette communication seuls les résultats obtenus sur la première tranche sont exploitables. On rappelle que cette première tranche est dédiée à la reconnaissance d'indicateurs de durabilité que sont la teneur en eau du béton, sa porosité et son module d'Young. Les mesures ont été réalisées sous la forme d'essais croisés au cours desquels toutes les techniques de mesure ont été mises en œuvre dans un délai relativement court (de l'ordre de 2 à 3 semaines). Les corps d'épreuve sont des dalles de dimensions 50 cm x 25 cm x 12 cm. D'un point de vue opérationnel cette tranche de caractérisation a été découpée en trois campagnes de mesure. Une première campagne de mesure a consisté à traiter tous les corps d'épreuve de béton à l'état sec, une deuxième à l'état saturé et enfin une troisième campagne a été consacrée aux états de saturation intermédiaires.

Le tableau 1 présente l'ensemble des compositions de béton testées et le découpage en trois campagnes de mesure. On a fait varier les paramètres suivants :

- la nature des granulats (calcaires ou siliceux),
- la forme des granulats (roulés ou concassés),
- la taille des granulats ( $D_{max} = 14$  ou  $20$  mm),
- la porosité, en faisant varier le dosage Eau/Ciment (E/C) pour cinq compositions (G1, G2, G3, G7 et G8).

La composition G3 a été fabriquée deux fois pour analyser l'influence de la variabilité des conditions de fabrication.


Granulats	Siliceux roulés <i>0 – 14 mm</i>					Siliceux roulés <i>0-20 mm</i>	Siliceux concassés <i>0-14 mm</i>	Calcaires concassés <i>0-14 mm</i>
	0,30	0,45	0,55	0,65	0,80	0,55	0,55	0,55
E/C ( <i>Porosité</i> )	0,30	0,45	0,55	0,65	0,80	0,55	0,55	0,55
Référence	G1	G2	G3 G3a	G7	G8	G4	G5	G6
Nombre de gâchées (*)	1	1	2	1	1	1	1	1
Degré de saturation 	Nombre de corps d'épreuve à tester							
Essais 1	0	8	8	16	8	8	8	8
Essais 3	40	3	3	6	3	3	3	3
	60	3	3	6	3	3	3	3
	80	3	3	6	3	3	3	3
Essais 2	100	8	8	16	8	8	8	8

Tableau 1 : ensemble du corpus de test de la tranche 1

La première et la deuxième campagne (respectivement aux états secs et saturés) ont permis pour chacune des compositions de réaliser les mesures sur 8 corps d'épreuve. En parallèle des essais non destructifs, les indicateurs visés (porosité et module d'Young pour l'essentiel mais aussi résistance en compression et perméabilité à l'air) ont été mesurés sur des prélèvements par essais destructifs. A titre d'exemple, la figure 1 présente les résultats obtenus par la mesure du module d'Young, à l'état sec et à l'état saturé.

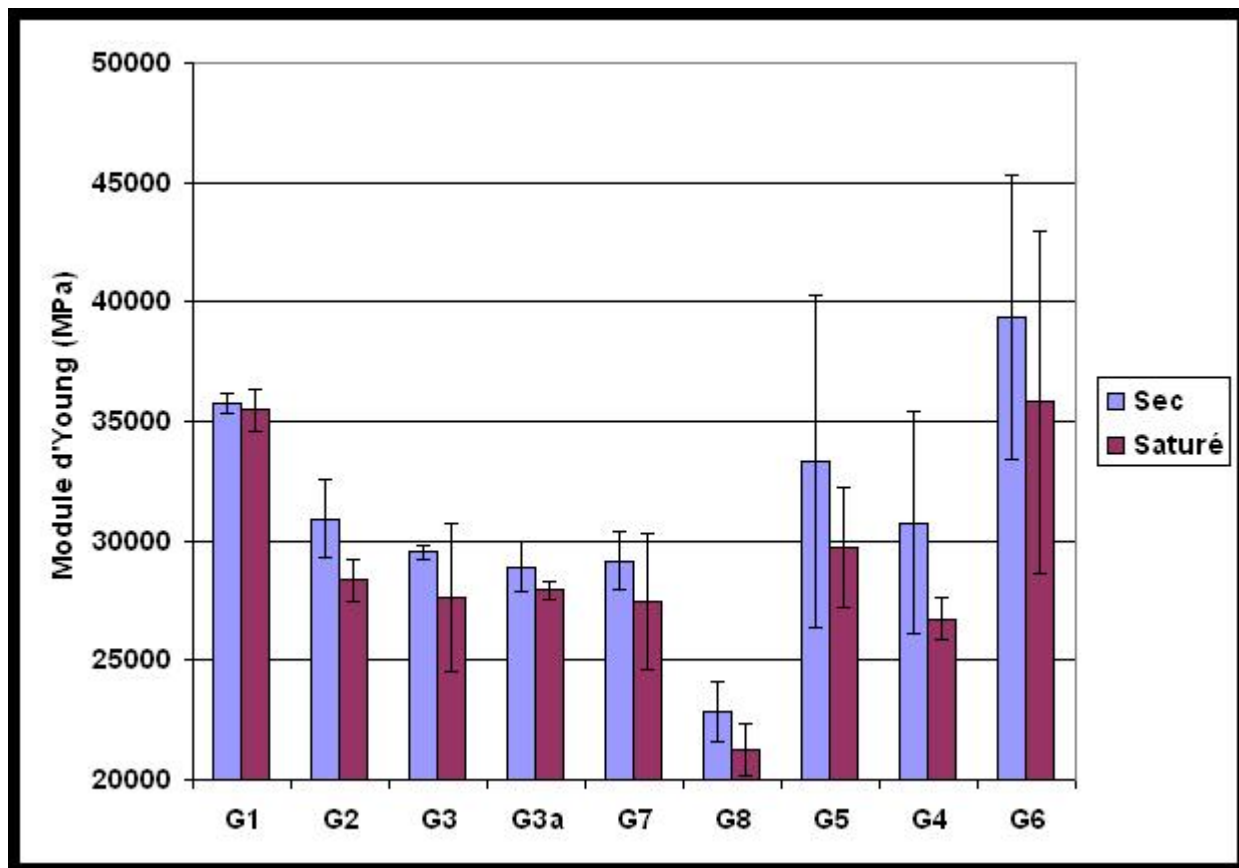


Figure 1 : modules d'Young mesurés sur carottes pour les différentes formulations aux états secs ou saturés

En ce qui concerne le module d'Young (figure 2) on remarque que :

- globalement, les cinq bétons G1, G2, G3, G7 et G8 ont des modules qui diminuent avec l'augmentation de la porosité.
- le type de granulats utilisés a un effet significatif sur la valeur du module. En particulier la nature minéralogique a un effet très marqué, puisqu'à porosité comparable, le béton G6 (granulats calcaires) présente un module aussi élevé que le béton G1 (E/C 0,3 et porosité de 12%). Le comportement particulier de ce béton sera ensuite parfaitement mis en évidence par les techniques non destructives.

Pour ce qui est de la mesure de la porosité on remarque que :

- la porosité des bétons G1, G2, G3, G7 et G8 varie dans une gamme de 12 à 18%. L'objectif visé consistant à disposer de plusieurs bétons de porosités différentes avec des constituants identiques est donc atteint,
- les bétons G5 et G6 sont dans la même gamme que le béton G3 ce qui est également conforme à ce que nous souhaitons. Seul G4 a une porosité plus faible mais en restant dans le même ordre de grandeur.

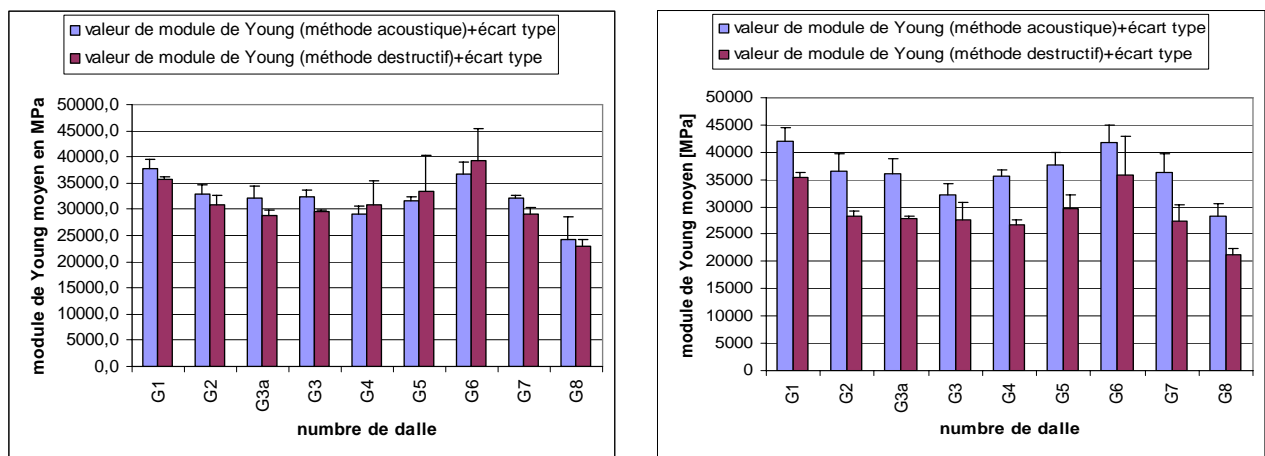
Du point de vue de l'évaluation non destructive, sur la base des différentes familles de techniques mises en œuvre (radar, ultrasons, électrique, thermographie) au total 10 moyens de mesure différents ont été mis en œuvre. Il s'agit de :

- Thermographie Infrarouge passive
- Résistivité électrique
- Mesure de vitesse d'onde directe radar
- Mesure d'amplitude d'onde directe radar
- Méthode capacitive
- Ondes de surface ultrasonores avec contact (réception par vibromètre laser)
- Ondes de surface ultrasonores sans contact
- US en transmission avec contact
- Impact echo

Chacun de ces moyens de mesure a fourni un nombre d'observables variables, mais dans tous les cas toujours supérieur à un. Le nombre d'observables total est d'environ 60.

A titre d'exemple, la figure 2 présente la corrélation entre les modules mesurés sur carottes sous charge et les modules évalués à partir de la mesure des vitesses longitudinales et de Rayleigh par la relation (1) :

$$V_R \cong \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{I}{2(1+\nu)}} \frac{I}{1.14418 - 0.25771\nu + 0.1266\nu^2} \quad (1)$$



(a)

(b)

Figure 2 : Module d'Young statique et dynamique  
(a) Béton à l'état sec – (b) : béton à l'état saturé

On remarque que les modules statique et dynamique suivent la même tendance en fonction de la composition. A l'état sec, le module dynamique est, au plus, supérieur de 10 % au module statique, sauf pour les 3 compositions de granulométrie différente (G4, G5 et G6). A l'état saturé, cette différence s'accroît (le module dynamique est jusqu'à 30 % supérieur au module statique). De plus, comparé à l'état sec, le module dynamique augmente et le module statique diminue légèrement. Cette différence de comportement entre l'état sec et saturé pourrait s'expliquer par l'absence de mouvement du fluide saturant aux fréquences ultrasonores, d'où une augmentation de la rigidité du matériau [1].



D'autres corrélations entre observables et indicateurs ont été faits pour d'autres techniques de mesure (par exemple capacitif et radar) [2].

La figure 3 présente la variation de la vitesse de l'onde directe radar en fonction du degré de saturation des bétons. Pour l'ensemble des bétons, excepté le béton G6, tous les points sont situés dans un fuseau assez serré et la vitesse diminue de façon monotone avec l'augmentation du degré de saturation. Il s'agit d'un phénomène déjà observé et assez connu qui est lié à l'augmentation de la permittivité du milieu avec l'augmentation de la teneur en eau, ce qui accroît sa capacité à polariser l'onde radar et par voie de conséquence à causer son ralentissement.

On remarque toutefois que pour le béton B6, les points semblent s'éloigner du fuseau. On rappelle que ce béton est réalisé à base de granulats calcaires, dont la permittivité est sensiblement plus élevée de celle des granulats siliceux utilisés dans les autres formulations. Cette plus forte permittivité est à l'origine des plus faibles vitesses mesurées sur ce béton.

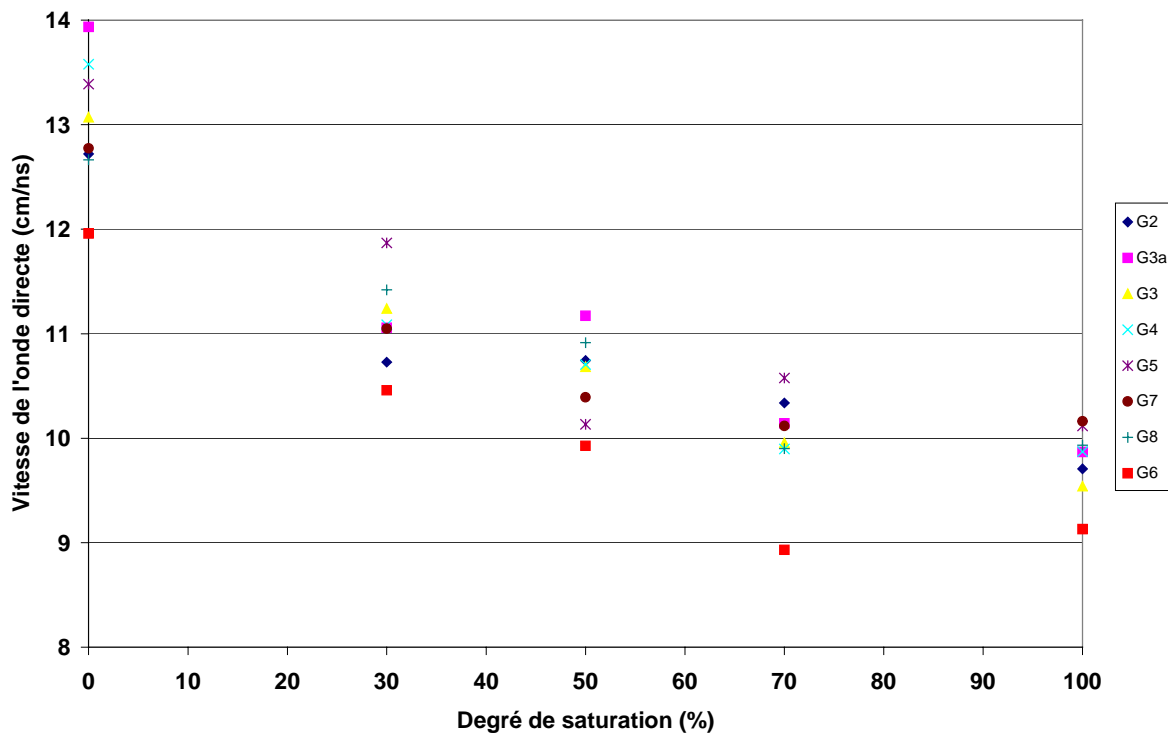


Figure 3 : vitesse de l'onde directe radar en fonction du degré de saturation

### 3.2. ANALYSE DES DONNEES

Pour chaque série de mesures croisées mettant en œuvre simultanément toutes les techniques près de 25000 mesures ont été collectées. Après avoir procédé aux moyennes des valeurs obtenues en plusieurs points, un corps d'épreuve est caractérisé par 60 observables aux origines totalement différentes (ultrasons, radar, électrique). L'objectif de l'analyse des données est d'établir comment la mesure des observables permet d'estimer, via des relations explicites ou implicites, la valeur des indicateurs.

On cherche ensuite à définir des critères de qualité et de performance des observables. On calcule pour cela les variances de mesure (et les coefficients de variation correspondants) à différents niveaux pour chaque observable :

- la variance V1 résulte de l'imparfaite répétabilité d'une mesure au même point de l'éprouvette. On l'estime en répétant 10 fois la même mesure ;
- la variance V2 résulte de la variabilité interne de l'éprouvette, du fait de l'hétérogénéité du matériau. On l'estime en déplaçant le capteur et en répétant la mesure, pour chacune des éprouvettes. On calcule sa valeur moyenne pour toutes les éprouvettes d'une même gâchée. A priori, la variance V2 est plus grande que V1, car elle résulte de la variabilité de répétabilité et de la variabilité liée à l'hétérogénéité locale du matériau ;
- la variance V3 résulte de la variabilité de fabrication du matériau à l'intérieur d'une même gâchée. On l'estime à partir des moyennes entre les 8 éprouvettes d'une même composition théorique ;
- la variance V3a quantifie l'imparfaite reproductibilité de la gâchée. Elle est calculée en comparant les moyennes des mesures obtenues sur une gâchée dupliquée (deux séries de 8 éprouvettes des gâchées G3 et G3a). Elle devrait être nulle si les gâchées étaient réellement identiques et les mesures parfaites ;
- la variance V4 résulte du contraste entre les différents bétons. Elle est calculée à partir des moyennes obtenues sur toutes les gâchées. Elle peut être calculée sur l'ensemble des mesures, ou sur les mesures relatives à une seule campagne (par exemple bétons secs).

On définit un indice de qualité synthétique IQ sous la forme suivante (2) :

$$IQ = 2 * \log (V4/V3) - \log (V1/V2) - \log (V3a/V3) \quad (2)$$

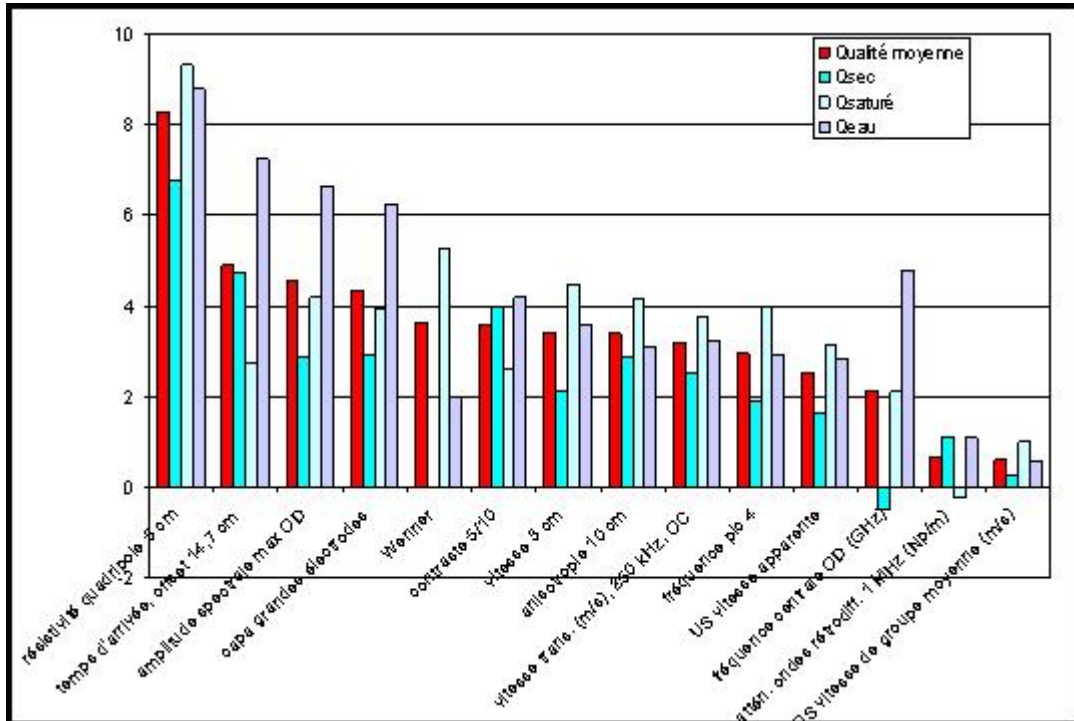


Figure 4 : Indicateur de qualité pour un ensemble d'observables

L'indicateur de qualité est calculé : (a) pour les mesures à l'état sec, (b) pour les mesures à l'état saturé, (c) pour l'ensemble des mesures sec + saturé (figure 4). L'indicateur de qualité moyen est calculé en faisant la moyenne des trois valeurs obtenues.

On peut définir de la même manière un indice de pertinence synthétique IP. Une difficulté vient de ce que la pertinence d'un observable n'est pas une propriété intrinsèque de cet observable, mais qu'elle dépend aussi de l'objectif du diagnostic. Le degré de pertinence dépend de la corrélation entre la valeur de l'observable et la valeur de l'indicateur que l'on cherche à estimer. La pertinence est maximale si la corrélation est parfaite (dans ce cas mesurer l'observable revient à quantifier exactement l'indicateur). Elle diminue si la qualité de la corrélation décroît, ce qui peut se produire pour deux raisons :

- l'observable n'est pas sensible à l'indicateur (une valeur faible ou une valeur forte de l'indicateur donne la même valeur de l'observable, qui ne peut donc renseigner sur la valeur de l'observable),
- l'observable est sensible à l'indicateur, mais mesuré avec une imprécision qui nuit à la qualité de la corrélation, et donc à la qualité de l'estimation de l'indicateur.

En l'absence d'objectifs de diagnostic précis, on peut adopter une définition provisoire (qui sera adaptée selon les objectifs) sous la forme suivante qui est calculée à partir des coefficients de corrélation entre observables et indicateurs  $r$  (3):

$$IP = |r(\text{Obs, porosité})| + |r(\text{Obs, teneur en eau})| + |r(\text{Obs, module})| + |r(\text{Obs, résistance})| \quad (3)$$

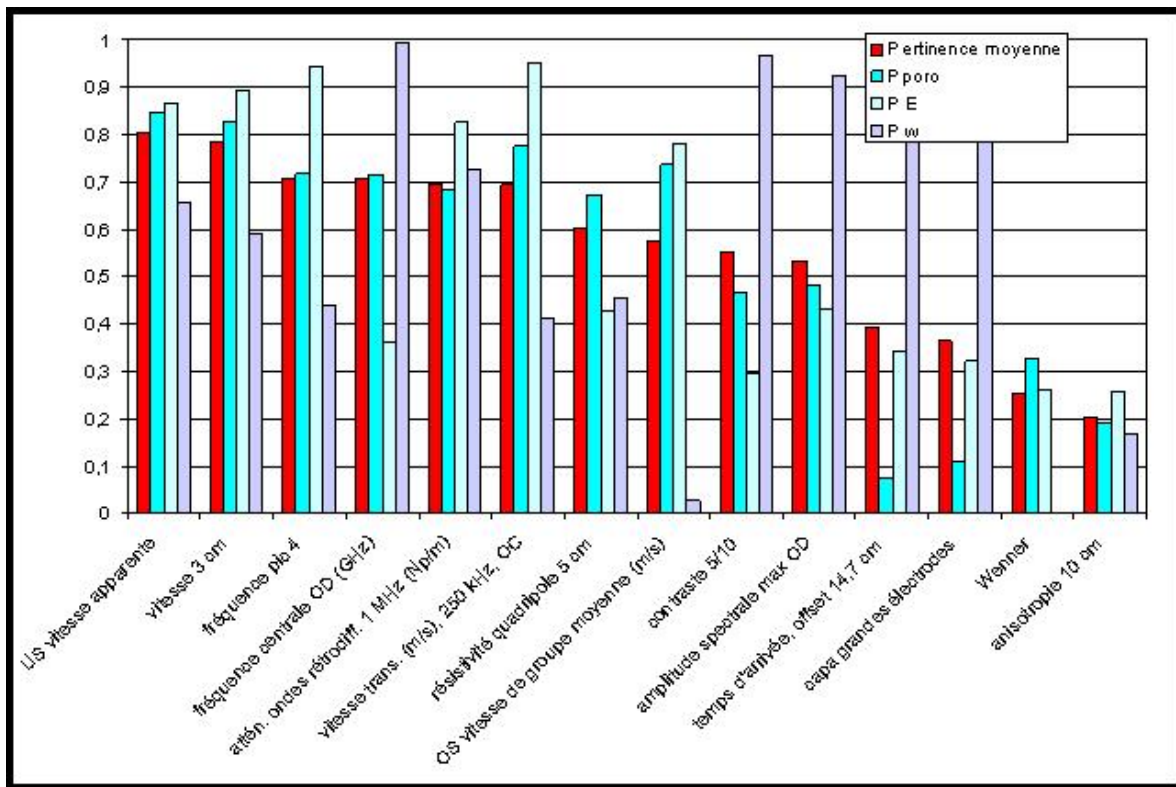


Figure 5 : indice de pertinence pour 3 indicateurs

Cette définition rassemble les aptitudes potentielles au diagnostic de la porosité, de la teneur en eau, du module et de la résistance mécanique. La figure 5 rassemble les différentes valeurs de  $r$  pour un ensemble d'observables. Les situations sont contrastées selon les

observables. Dans certains cas, l'observable est très bien corrélé à plusieurs indicateurs (par exemple la vitesse de transmission en ondes de compression à  $\{p, E, f_c\}$ ), mais médiocrement à la teneur en eau. D'autres observables (par exemple la capacité ou le temps d'arrivée radar) sont très bien corrélés à la teneur en eau et très mal (ou pas du tout) aux autres indicateurs. On a enfin des situations intermédiaires, avec des corrélations moyennes à tous les indicateurs (cas de la résistivité).

Il conviendra d'exploiter le plus intelligemment possible des corrélations (ou absences de corrélation) pour construire des stratégies de combinaisons des observables quand plusieurs indicateurs varient [3].

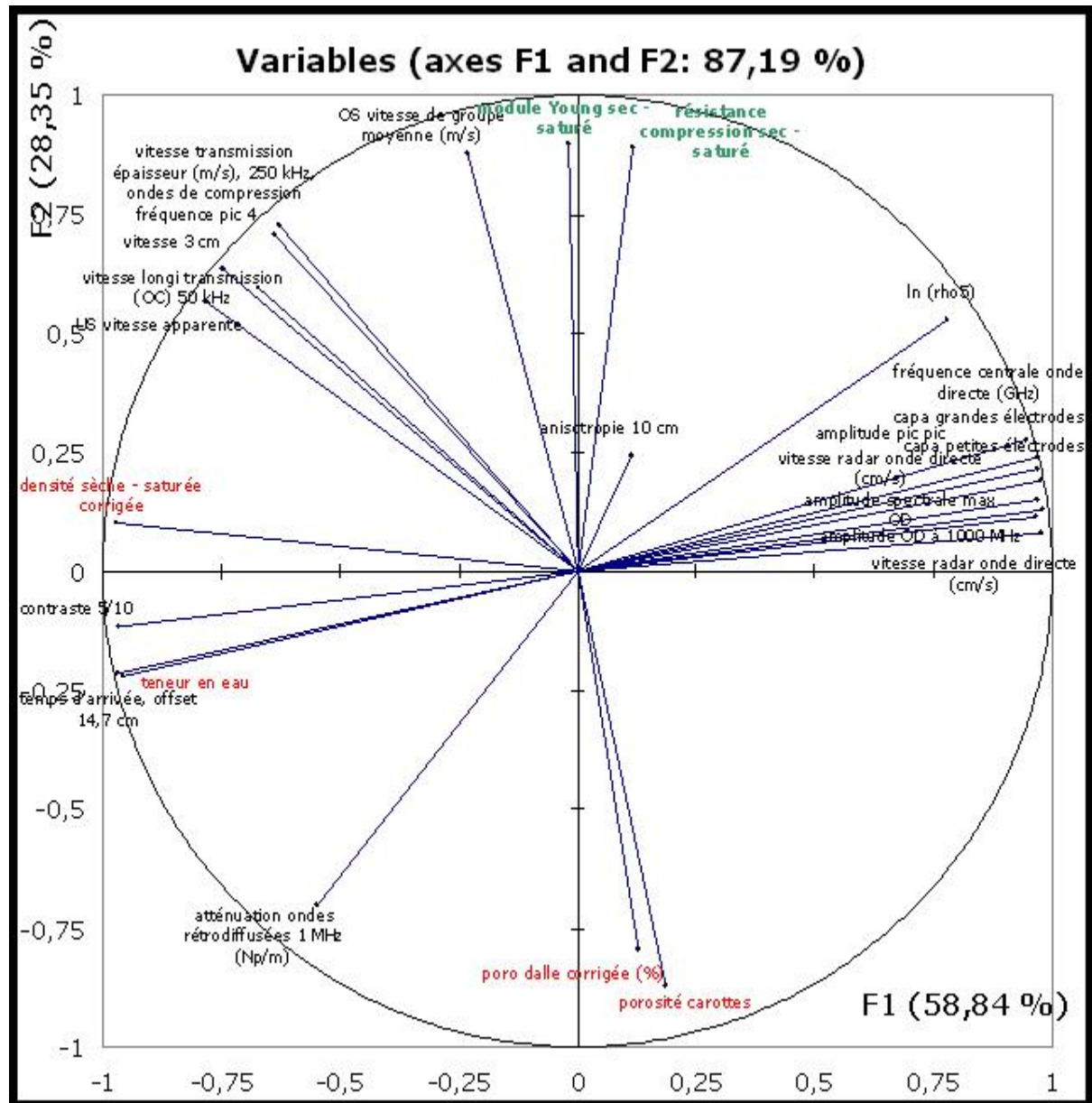


Figure 5 : Analyse en Composantes Principales (ACP)

Etant donné le grand nombre d'indicateurs et d'observables, une analyse exhaustive et systématique de ces relations est fastidieuse. L'analyse en composantes principales fournit de façon synthétique un éclairage utile. Nous avons procédé à une ACP sur l'ensemble les

indicateurs sélectionnés (en ayant cependant supprimé quelques observables redondants), en deux étapes, d'abord en considérant comme individus les gâchées, puis en considérant comme individus les corps d'épreuve. La figure 5 représente la position des variables dans le premier plan factoriel, qui contient 87 % de l'inertie totale. L'interprétation de ce schéma est facilitée par la position des indicateurs. On remarque sur ce diagramme que la presque totalité des observables est porteuse d'informations vis à vis des indicateurs recherchés. On observe ensuite que les meilleures corrélations concernent d'une part les méthodes acoustiques et la porosité ou le module d'Young (dans une moindre mesure toutefois) et d'autre part les méthodes radar, capacitives et électriques et la teneur en eau. La mise en œuvre de cet outil statistique est également un outil discriminant vis à vis d'un choix potentiel de méthodes pour un problème donné.

### 3.3. FUSION DES DONNEES

L'étude d'une stratégie de fusion de données dans le cadre du projet SENSO a pour but :

- de combiner certains des 60 observables issues de techniques de contrôle non destructif afin d'estimer au mieux des indicateurs tels que le taux de porosité, la teneur en eau, la carbonatation, la contamination par les chlorures...
- de proposer une confiance dans cette estimation.

L'objectif est d'avancer un diagnostic quant à l'état de santé de structures en béton. Chaque mesure d'observable telle que la vitesse ultrasonore, la résistivité, l'amplitude radar, est susceptible de fournir une estimation du (ou des) indicateur(s) recherché(s), avec une confiance relative à la fiabilité et à la sensibilité de la mesure face aux évolutions de l'indicateur. Cette confiance est issue du traitement statistique des données issues des expérimentations et corrélations réalisées.

La fusion de données permet de tirer parti de la redondance des informations, ou de leur complémentarité, lorsque plusieurs techniques observent la même information.

D'une façon idéale, lorsque les données convergent vers une même valeur de l'indicateur, elles renforcent la confiance au résultat. A l'inverse lorsqu'elles ne convergent pas, et qu'elles deviennent contradictoires, la fusion permet de gérer le cas de conflit.

La procédure de fusion de données a été élaborée à partir de la théorie des possibilités [4]. Cette procédure tient compte de la variabilité des mesures et de la fiabilité de chaque observable considérée (variabilités et indicateurs de qualité issus du traitement des données), ainsi que de la concordance des informations fournies par les différentes sources (ou valeurs d'observables) les unes par rapport aux autres.

		G3 Sec	G3 Saturé	G3a Sec	G3a Saturé	G7 Sec	G7 Saturé	G8 Sec	G8 Saturé
Taux de porosité (%)	Fusionné	15.2	14.8	16	14.8	15.8	15	18.6	18
	Mesuré	15.5	15.5	16	16	15.9	15.9	18.1	18.1
Saturation en eau (%)	Fusionné	0	100	0	94	8	98	4	92
	Mesuré	0	100	0	100	0	100	0	100

Tableau 2 : résultats obtenus après fusion des données

Les résultats présentés dans le tableau 2 à titre d'exemple, concernent la mise en œuvre de cette procédure pour la prédiction de la porosité et du degré de saturation de certaines formulations à partir des mesures effectuées sur les corps d'épreuve à l'état sec et saturé. Ici les résultats ont été fusionnés à partir de quatre techniques de mesure : les ultrasons, la méthode capacitive, la résistivité et le radar.

Les valeurs déterminées par fusion montrent un écart maximum de 1.2 en taux de porosité et de 8 en degré de saturation.

#### **4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

Les résultats présentés dans cette communication concernent l'exploitation d'une partie des résultats du projet SENSO. Nous avons montré comment a été construit le programme expérimental qui doit servir de base à l'établissement des lois de corrélation entre les observables issues de la mesure et les indicateurs visés. En particulier, nous avons mis l'accent sur la prise en compte dans le programme de la variabilité des mesures liées d'une part à la précision des techniques et d'autre à la variabilité du matériau. Nous avons ensuite montré comment les résultats étaient exploités afin de relier les observables mesurées aux indicateurs visés. Les différents niveaux de variabilité ont ensuite été détaillés et exploités pour mettre en évidence le niveau de qualité des techniques vis à vis des indicateurs visés. Enfin, des lois de corrélation ont été établies entre les observables et les indicateurs et la qualité de la corrélation a permis de définir un indice de pertinence pour chacune des techniques employées. Enfin, nous avons brièvement présenté la méthodologie de fusion développée dans le cadre de ce travail et, au travers d'un exemple, nous avons montré qu'elle avait pu être mise en œuvre avec succès pour évaluer deux indicateurs.

En termes de perspectives, l'ensemble de cette démarche implémentée sur des corps d'épreuve de laboratoire doit maintenant être mise en œuvre sur des résultats provenant d'ouvrages réels. Deux campagnes d'essai sur ouvrages réels ont été réalisées, leurs résultats sont actuellement en cours de traitement dans cette optique.

#### **5. REMERCIEMENTS**

Les auteurs remercient les participants au projet SENSO pour leurs contributions à cette communication.

L'ensemble des acteurs du projet remercie l'Agence Nationale de la Recherche pour son soutien financier.

#### **6. BIBLIOGRAPHIE**

[1] Marc Goueygou, Fethi Soltani, Zoubeir Lafhaj, Bogdan Piwakowski, Pawel Safinowski, Jean-Paul Balayssac, Relations entre la vitesse ultrasonore, la porosité et la perméabilité dans le mortier et le béton, actes du congrès Diagnobéton 2007 (CD ROM), Aix-en-Provence, 10-11 mai 2007

[2] G. Villain, X. Dérobert, O. Abraham, M. Chekroun, O. Coffec et O. Durand Complémentarité de techniques non destructives pour déterminer les propriétés de différents bétons hydrauliques, Congrès COFREND 2008, Toulouse

[3] D. Breyse, S.M. Elachachi, J.P. Balayssac, S. Laurens, Diagnostic de l'état du béton : combinaison d'informations et réduction des incertitudes, article à paraître dans la Revue Européenne de Génie Civil, 2008

[4] Ploix M.A., Garnier V., Moysan J. Théorie des possibilités appliquée à l'END du béton, Congrès COFREND 2008, Toulouse

[5] Rapport intermédiaire du projet SENSO « Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton », Juin 2007