
Diagnostic de l'état du béton : combinaison d'informations et réduction des incertitudes

D. Breysse¹, S.M. Elachachi¹, J.P. Balayssac², S. Laurens²

¹ Université Bordeaux 1, CDGA/Ghymac, d.breysse@cdga.u-bordeaux1.fr

² LMDC, Université Paul Sabatier, Toulouse

RESUME : L'utilisation et la combinaison de techniques de contrôle non destructif (CND) n'a un intérêt réel que lorsque ces techniques fournissent une information pertinente, utile au diagnostic de l'état du matériau. Le recours au CND repose le plus souvent sur une expertise informelle. L'analyse et la quantification plus systématique des capacités de différentes techniques (précision, sensibilité, degré informatif) sont des préalables indispensables à leur plus large diffusion. Nous illustrons la démarche entreprise dans le cadre du Projet SENSO pour étudier dans quelle mesure les techniques de CND peuvent être utilisées, seules ou en combinaison pour affiner le diagnostic et fournir des informations quantitatives sur des propriétés du matériau telles que la porosité, le module ou la résistance mécanique. On détaille en particulier l'approche des incertitudes relatives à la variabilité de la mesure et la procédure d'identification de techniques pertinentes pour un objectif fixé.

MOTS-CLES : béton, contrôle non destructif, diagnostic, incertitude, variabilité

ABSTRACT: Non destructive techniques (NDT) have an interest only if they provide a relevant material information, useful for its assessment. Moreoften, use of NDT is a matter of expertise. A more systematic analysis and a better quantification of various techniques ability (accuracy, sensitivity, informant degree) are unavoidable prerequisites before their wider useness. In this paper the startegy followed in the SENSO Project is discussed. It aims at studying how NDT can be used, alone or in combination, to improve the assessment and to provide quantitative data about material properties like porosity, modulus or strength. The approach of uncertainties in relation with the measurement variability and the way to identify relevant techniques for a given purpose are two points which we have chosen to discuss.

KEYWORDS: assessment, concrete, non destructive techniques, uncertainty, variability

1. Introduction : variabilité, incertitudes et qualité du diagnostic

Le diagnostic de la nature et de l'état du béton armé constitue un enjeu majeur, en amont de toutes les politiques de maintenance des ouvrages (Bungey et Millard, 1986, Breyse et Abraham, 2005). Depuis une dizaine d'années se sont développées des actions de recherche pour mieux cerner les mécanismes d'altération du béton armé et les aptitudes des différentes techniques de contrôle non destructif (CND) pour identifier l'état du matériau (Balayssac et al, 2005).

Pour une grandeur physique donnée, évaluée via le CND, les incertitudes ont pour origine : (a) la précision et la répétabilité du processus de mesure en un point donné du matériau, (b) la variabilité du matériau à différentes échelles : à l'intérieur d'un volume censé être homogène (du fait de sa microstructure composite), entre les différentes éprouvettes d'une même composition (issues d'une même gâchée ou de deux gâchées successives).

Le diagnostic des ouvrages repose souvent sur la détection de zones d'altération, c'est-à-dire de zones dans lesquelles les propriétés (porosité, teneur en eau, fissuration...) se distinguent significativement des valeurs représentatives des zones « saines ». La difficulté consiste donc, pour le paramètre recherché (qui n'est en général estimé qu'indirectement), à identifier dans quelle mesure les différences relevées entre la zone « saine » et la zone « altérée » traduisent des propriétés effectivement différentes ou, au contraire, peuvent soit relever de la variabilité naturelle du matériau, soit s'expliquer par un manque de précision de la mesure. Fournir aux experts en diagnostic des outils plus fiables passe donc par l'identification des niveaux d'incertitude qui peuvent être attachés aux différentes mesures, par l'établissement des corrélations entre mesure et propriété recherchée, et par l'analyse du degré de signification de ces corrélations. On pourra alors attacher à chaque estimation une certaine qualité et disposer d'un diagnostic de qualité.

De nombreux experts proposent de combiner plusieurs techniques de diagnostic, chacune fournissant une information complétant l'information fournie par la technique précédente (Dérobert et al., 2005, Naar et al., 2005, Dilek, 2006, Soshiroda et al., 2006). Cette démarche n'est intéressante que dans la mesure où le surcoût (en temps et financier) de l'exploration complémentaire est compensé par l'amélioration de la qualité du diagnostic (Gehlen et al, 2006). Là encore, la connaissance de la qualité des estimations est la seule manière de répondre de manière rationnelle à cette question. Il faut en outre identifier dans quelle mesure les informations fournies sont redondantes ou complémentaires.

2. Stratégie expérimentale : analyse de la variabilité à différentes échelles

Le Projet ANR-SENSO, initié en 2006, vise à appréhender les incertitudes à différents niveaux et à développer le couplage entre différentes techniques de contrôle non destructif. Nous n'en détaillerons pas ici le programme expérimental, et nous nous limiterons à l'analyse de résultats obtenus dans une première phase, qui concerne des éprouvettes de béton sain, de différentes compositions. Les corps

d'épreuve se présentent sous la forme de dalles, issues de 9 gâchées, dans lesquelles on a fait varier rapport e/c (de 0,30 à 0.90), la nature minéralogique, la taille et la forme des granulats. On dispose de huit éprouvettes par gâchée, sur lesquelles dans un état de référence dit « sec » (après étuvage et stabilisation), on a procédé à un ensemble de mesures CND :

- mesures radar (LCPC Nantes, LMDC Toulouse) : mesures de vitesse et d'atténuation,
- mesures acoustiques (LCPC Nantes, Polytech Lille, LCND Aix) : mesures de vitesse d'ondes de compression et d'ondes ultrasonores, impact-écho, mesures d'atténuation et de dispersion,
- mesures électriques (CDGA Bordeaux) : résistivité,
- mesures capacitatives (LCPC Nantes) et thermographiques infrarouge (CDGA Bordeaux).

On dispose au final d'environ 70 grandeurs observables brutes par corps d'épreuve et d'une estimation de leur qualité/variabilité à différentes échelles (nous n'évoquerons dans ce qui suit qu'un nombre réduit d'observables, afin d'illustrer la démarche). Par ailleurs, on mesure, sur les mêmes corps d'épreuves ou sur des éprouvettes de contrôle des grandeurs physiques et mécaniques qui feront l'objet du diagnostic (c.à.d. dont on cherche à prédire la valeur) : porosité, module d'Young, résistance en compression. Dans la suite du programme, on fera évoluer la teneur en eau et les altérations dans ces corps d'épreuve.

On calcule 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 ;
- 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 est calculée en comparant les moyennes des mesures obtenues sur une gâchée dupliquée (deux séries de 8 éprouvettes). 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.

3. Identification des observables les plus pertinents

La pertinence d'une technique de mesure (et de l'observable correspondant), dans une logique de diagnostic, résulte de plusieurs critères indépendants :

- précision : la variance V1 doit être la plus faible possible,
- justesse, entre autres en fournissant des valeurs identiques sur des bétons identiques : la variance V3a doit être la plus faible possible,
- sensibilité, en révélant le contraste entre bétons différents : la variance V4 doit être la plus élevée possible. En fait, l'insensibilité à un paramètre peut aussi avoir un intérêt quand on combine deux techniques, dont la première est sensible à deux grandeurs physiques et la seconde à une seule des deux grandeurs.

Un premier travail consiste, pour chaque observable, à calculer les variances aux différents niveaux (on travaille en fait sur des rapports de variance, pour avoir des grandeurs sans dimension). La figure 1 illustre les rapports obtenus pour six observables (le temps d'arrivée de l'onde radar, la fréquence mesurée en impact-écho, la fréquence mesurée en technique capacitive, la résistivité électrique, la vitesse de phase en ondes ultrasonores, la vitesse de transmission en ondes ultrasonores) en normant les valeurs par V4. On constate que les 4 premiers observables présentent un profil très intéressant, V4 étant très supérieure aux autres variances, ces observables sont à la fois précis et potentiellement informatifs. On note aussi que le rapport V3a/V3 est faible, voire très faible. A l'inverse, le cinquième observable souffre d'une forte variabilité locale et le sixième d'un fort rapport V3a/V3.

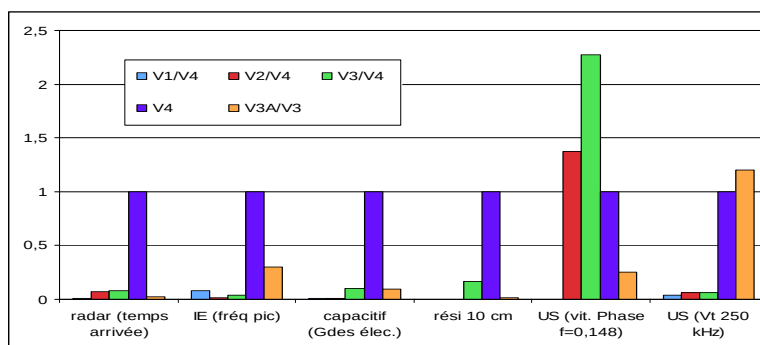


Figure 1. Rapports de variance pour six observables.

Dans un deuxième temps, on identifie les corrélations (par régressions linéaires en général) entre chaque observable et chaque grandeur à diagnostiquer (porosité, module, résistance). La figure 2 illustre le type de relation obtenue, pour l'observable « Vt US » avec la porosité. Le graphique de gauche est établi à partir des valeurs moyennes sur les gâchées, celui de droite avec l'ensemble des valeurs individuelles par corps d'épreuve. Les équations de régression sont respectivement :

$$V \text{ (m/s)} = 5332 - 65,4 p \text{ (\%)} \quad r^2 = 0,72$$

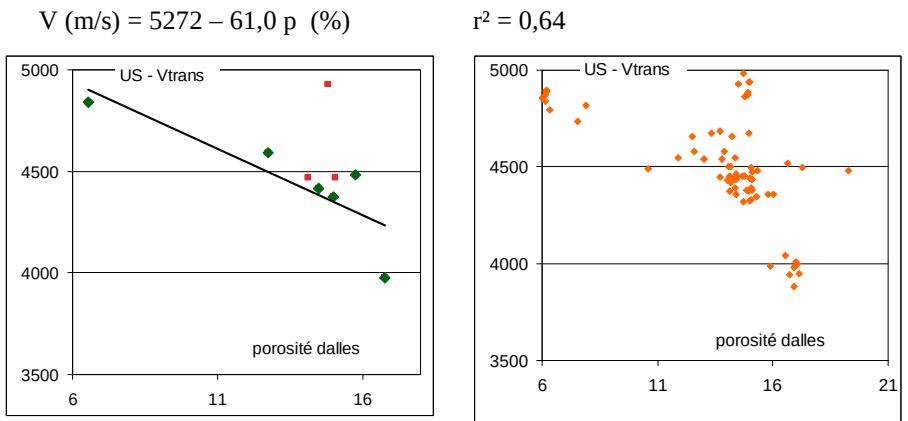


Figure 2. Corrélation entre la vitesse de transmission des ondes ultrasonores à l'échelle des moyennes par gâchée, et à l'échelle de chaque éprouvette..

La différence entre les deux graphiques illustre clairement l'effet de la variabilité V_2 , qui a pour conséquence de produire un « nuage » autour du point moyen de la gâchée, et d'abaisser la précision de la prédiction $V(p)$ par le modèle de régression. Sur le graphique de gauche, les figurés de grande taille correspondent aux 6 gâchées pour lesquelles le seul paramètre variable est le rapport e/c (c'est sur ces gâchées que sont établies les régressions ci-dessus), et les figurés de petite taille à trois gâchées supplémentaires pour lesquelles ont varié des caractéristiques des granulats. On notera que la régression n'est pas apte à prédire la réponse d'une des gâchée, pour laquelle la vitesse est de 500 m/s plus rapide que ce que prédit la régression. On a pourtant simplement, dans cette gâchée, substitué des granulats siliceux aux granulats calcaires.

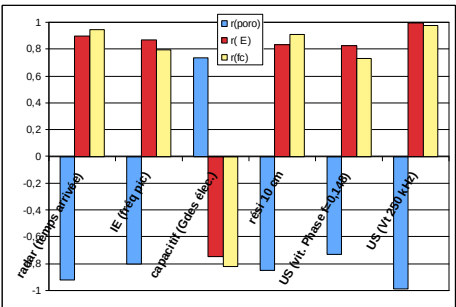


Figure 3. Coefficients de corrélation avec la porosité, le module et la résistance pour six observables.

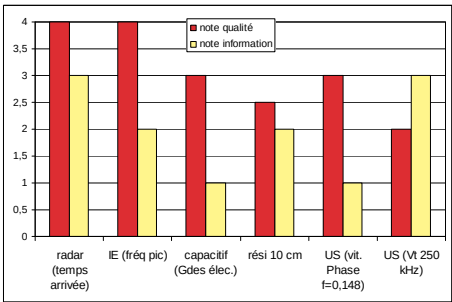


Figure 4. Indicateurs de pertinence pour six observables

La figure 3 regroupe, pour les six observables, les valeurs des coefficients de régression r pour trois grandeurs : porosité, module d'Young et résistance en

compression. L'observable est d'autant plus informatif que ce coefficient est voisin de -1 ou de 1.

On peut donc, à partir des informations précédentes, affecter à chaque observable un indicateur de qualité (qui agrège plusieurs sous-critères sur les valeurs de variabilité) et un indicateur informatif. La pertinence de l'observable résulte de ces deux valeurs, comme l'illustre la figure 4.

4. Diagnostic du matériau

La campagne expérimentale menée dans le Projet SENSO permet de disposer d'une base de données (qui se complétera au fil du projet), reliant les observables et leur variabilité aux différentes échelles.

4.1. Complémentarité des observables : analyse en correspondances principales

Les analyses précédentes ont porté sur les observables considérés individuellement. En pratique, les techniques de CND donnent accès à une mesure physique qui dépend des caractéristiques de la microstructure du matériau (porosité, teneur en eau, nature des granulats...) et des conditions de mesure (température...).

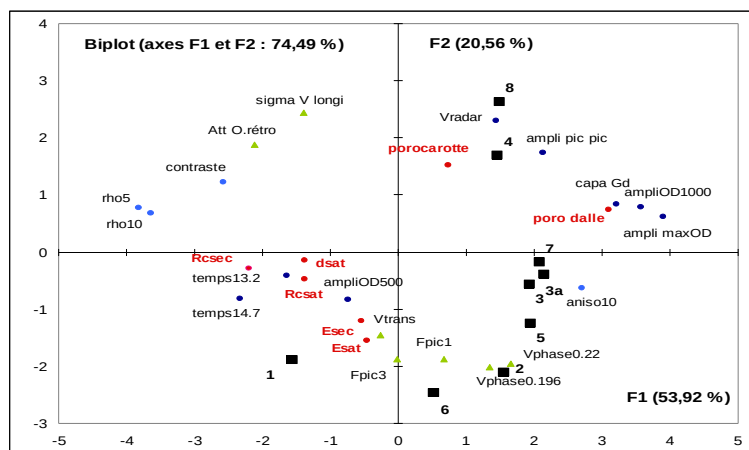


Figure 5. Représentation des corrélations dans le premier plan factoriel (observables et gâchées).

Les différents observables résultent en fait de l'excitation de ces mêmes caractéristiques par un phénomène physique (propagation d'ondes de différentes fréquences, diffusion d'un courant électrique...), ce qui induit des corrélations entre les observables. On peut avoir intérêt à utiliser des observables bien corrélés, si l'on souhaite conforter une conclusion ou, au contraire, utiliser des observables peu corrélés, pour exploiter leur complémentarité éventuelle. La figure 5 illustre la nature des corrélations par une projection dans le premier plan factoriel. Les figurés

carrés notés 1, 2, 3, 3a, 4 et 8 correspondent aux gâchées avec e/c décroissant dans cet ordre, ce qui est conforme à la position des fortes valeurs de module, résistance et densité dans le troisième quadrant et de forte porosité dans le premier quadrant.

La répartition des points représentatifs des observables dans les différents quadrants illustre la complémentarité potentielle des observables : certains sont très bien corrélés aux propriétés mécaniques. D'autres le sont moins bien, mais portent manifestement une information complémentaire : par exemple les mesures électriques sont très sensibles à la nature minéralogique des granulats.

4.2. Approche globale empirique par les réseaux de neurones

Une autre approche consiste à utiliser les réseaux de neurones pour estimer les propriétés recherchées. La méthode repose sur l'identification sur une base de données limitée, dite d'apprentissage, des relations entre les observables et les propriétés (cette identification est conduite au cours d'un processus d'optimisation en fournissant un jeu complet d'entrée-sorties). Le réseau de neurones est alors figé et utilisé de manière prédictive pour estimer les sorties du jeu de « test » pour lequel seules les entrées sont fournies. La figure 6 illustre la prédiction de la résistance en compression obtenue via une telle démarche. L'apprentissage a été conduit sur des corps d'épreuve issus des seules six gâchées à e/c variable, et le test sur des corps d'épreuves des neuf gâchées.

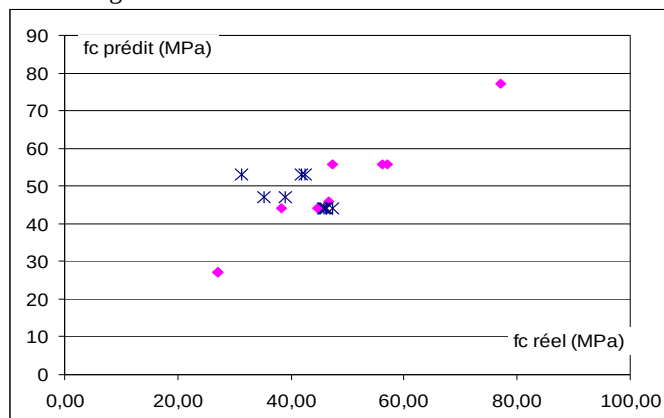


Figure 6. Représentation des corrélations dans le premier plan factoriel (observables et gâchées).

On constate que la prédiction est très correcte pour les éprouvettes issues des six gâchées d'apprentissage mais médiocre dans d'autres cas. En fait, l'approche par réseau de neurones est totalement empirique (elle présente en outre le désavantage d'être « boîte noire ») et s'avère incapable de prédire des propriétés dans des contextes très différents des situations d'apprentissage (ici changer la nature du granulat est un handicap rédhibitoire).

5. Conclusions et perspectives

Nous avons vu comment était mise en œuvre une campagne expérimentale avec l'objectif particulier d'établir les relations qui permettront d'améliorer le diagnostic d'état du béton, sur la base de la connaissance des relations quantifiées entre observables CND et grandeurs recherchées, et de la connaissance de la qualité de ces relations. La base de connaissances ainsi constituée sera exploitée par les différents partenaires du projet, qui testeront et compareront différentes approches : analyse statistique multifactorielle, réseaux de neurones, fusion de données...

On s'intéressera tout particulièrement au degré de précision des estimations fournies, et à la meilleure manière d'augmenter cette précision, en choisissant l'observable de CND le mieux adapté au but recherché, ou en combinant de la manière la plus appropriée plusieurs observables. Dans une phase prochaine, des mesures sur ouvrages réels viendront alimenter la base de données, afin d'adapter les hypothèses (en particulier sur la variabilité spatiale et temporelle du matériau et sur la qualité des mesures) aux situations concrètes de mesure.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des partenaires du Projet ANR-SENSO dont la contribution essentielle, sous la forme de campagnes de mesure, permet que ce travail ne se limite pas à une réflexion philosophique.

Références

- Bungey J.H., Millard S.G., *Testing of concrete in structures*, Blackie Acad. And Prof., 3rd edition, 1996, 286 p.
- Breysse D., Abraham O., *Guide méthodologique de l'évaluation non destructive des ouvrages en béton armé*, 2005, Presses ENPC, Paris.
- Gehlen C., Dauberschmidt C., Nürnberger U., Condition control of existing structures by performance testing, *Otto-Graf-Journal*, Vol. 17, 19-44, 2006.
- Dérobot X., Garnier V., François D., Lataste J.F., Laurens S., *Complémentarité des méthodes d'END*, in Guide méthodologique de l'évaluation non destructive des ouvrages en béton armé, ed. Breysse D., Abraham O., op. cit. 2005.
- Balayssac J.P. J.-P., *Evaluation de la dégradation du béton d'enrobage et aide au diagnostic et à la réparation des ouvrages*, Projet RGC&U, Final report, 2/2005.
- Naar S., Sirieix C., Breysse D., Dérobot X., *Assessment of water saturation rate in a reinforced concrete structures: non-destructive testing of Tarbes' precast duct*, ICCRC conf., Moscow, 5-9/09/2005.
- Dilek U., *Dynamic elastic Young's modulus of concrete disks in validation of stress wave based non-destructive testing technique results*, 85th TRB Annual meeting., 22-26/01/2006.
- Soshiroda T., Voraputhaporn K., Nozaki Y., *Early-stage inspection of concrete quality in structures by combined nondestructive method*, Mat. Str. 39:149-160, 2006.