

DIFFUSION MULTIPLE DES ULTRASONS POUR L'ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE DU BÉTON AVEC DES ONDES DE SURFACE.

MULTIPLE SCATTERING OF ULTRASONIC WAVES FOR NON DESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE USING SURFACE WAVES.

M. CHEKROUN^{1,2}, L. LU², L. LE MARREC³, O. ABRAHAM², G. VILLAIN², O. DURAND²

¹ Electricité De France (EDF R&D) – Chatou France

² Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) - Nantes France

³ Institut de Recherche Mathématiques de Rennes (IRMAR) – Rennes France.

Résumé

Des ondes ultrasonores de surface (dans la bande de fréquence 60 kHz – 180 kHz) sont utilisées pour caractériser les premiers centimètres de dalles de bétons. A ces fréquences, la longueur d'onde est du même ordre de grandeur que la dimension des granulats; le caractère fortement hétérogène du béton perturbe la propagation des ondes qui sont alors en régime de diffusion multiple. Les signaux peuvent être scindés en une partie cohérente (qui résiste au calcul des moyennes) et une partie non cohérente correspondant à la diffusion multiple de l'onde incidente sur une configuration donnée de granulats rencontrés. Il est donc nécessaire de mesurer plusieurs réalisations indépendantes du désordre afin d'évaluer le champ cohérent, qui décrit les propriétés d'un milieu homogène effectif. Pour cela, les mesures sont réalisées en surface à l'aide d'un interféromètre laser. On extrait des mesures les courbes de dispersion en vitesse de phase et d'atténuation pour les ondes de Rayleigh cohérentes. Ces courbes mettent en évidence un gradient de propriétés du béton étudié avec la profondeur.

Abstract

Surface ultrasonic waves (in the frequency bandwidth 60 kHz- 180 kHz) are used to characterize the first centimeters of concrete slabs. The wavelength for these frequencies is comparable to the size of the aggregates; the heterogeneities will disturb the waves and the propagation will be in a multiple scattering regime. Acquired signals will be composed of two parts: a coherent part, resisting to averaging over different realizations of disorder, and an incoherent part, corresponding to the multiple scattering on the given configuration of scatterers encountered. It is then necessary to acquire several independent realization of disorder to evaluate the coherent field, describing the material properties of an homogeneous effective medium. Measurements are carried out in surface with a laser interferometer. Dispersion and damping curves are evaluated from the measurements. These curves show the existence of graded properties with depth in cover concrete.

INTRODUCTION

Objectifs.

L'enjeu de l'étude de la durabilité des structures en béton armé est primordial. Le béton de peau (ou béton d'enrobage) protège les armatures d'acier contre les agents agressifs du milieu extérieur (eau, chlorures,...). Cette partie du béton étant directement en contact avec le milieu extérieur, c'est la partie qui sera la plus soumise aux dégradations. Une augmentation de la porosité du béton de peau favorisera la corrosion et le gonflement des armatures d'acier, conduisant à des macro- fissurations de la structure [1,2]. Il s'agit donc de d'étudier des méthodes non destructives permettant de caractériser ce béton d'enrobage, afin de diagnostiquer un éventuel début de détérioration avant que les macro-fissurations n'apparaissent.

Les bétons.

Le béton est un matériau hétérogène. Il est composé pour moitié de granulats, dont la taille peut varier de 5 mm à environ 20 mm, noyés dans une matrice de ciment appelé mortier. Ce mortier est lui-même composé d'un mélange de ciment, de sable et d'eau. Il est notamment caractérisé par son rapport massique d'eau sur ciment (rapport E/C) qui détermine entre autre sa porosité et ses propriétés mécaniques. La porosité du béton peut être comprise entre 12.5% et 18%. Elle est constituée de petits pores de différentes tailles allant du micromètre au millimètre, voire même de pores de grandes tailles de l'ordre du centimètre. Ces pores peuvent être plus ou moins remplis d'eau, ceci est caractérisé par ce que l'on appelle la teneur en eau. De nombreuses techniques non destructives complémentaires permettent d'évaluer ces différentes propriétés [3].

Propagation ultrasonore.

La propagation des ultrasons est directement liée aux propriétés mécaniques du matériau; la vitesse de phase permet de remonter à la masse volumique et les modules de compression et de cisaillement, tandis que l'atténuation est liée à sa porosité, à ses micro et macro fissurations, ou encore au degré d'hétérogénéité du matériau. Tout ceci en fait un excellent moyen d'évaluation des propriétés des matériaux [4].

Les ondes de surface (ondes de Rayleigh principalement) sont une combinaison particulière des ondes de volume de compression et de cisaillement qui se forme au voisinage des surfaces libres des matériaux. Ces ondes de surface sont très énergétiques. Leur profondeur de pénétration est de l'ordre de leur longueur d'onde. Ainsi, l'utilisation de longueurs d'onde millimétriques à centimétriques permet d'ausculter uniquement les premiers centimètres du béton. Cela en fait un outil idéal pour l'étude des bétons d'enrobage. De nombreuses études ont été réalisées avec des ondes de surface sur du mortier (ciment + sable, mais sans gros granulats) [5,6], mais très peu d'études ont été menées avec des ondes de surface sur des bétons dont la dimension des granulats est plus importante, et où le phénomène de diffusion multiple devient non négligeable.

Propagation en milieu hétérogène.

L'hétérogénéité du béton sera un paramètre très important à prendre en compte. Les longueurs d'ondes utilisées étant du même ordre de grandeur que les granulats, et il y aura donc une interaction forte entre les ultrasons et les granulats; les ondes se propageront en régime multidiffusif. La disposition des granulats dans le béton étant aléatoire, le traitement de leur influence ne pourra se faire que de manière statistique. Les signaux mesurés comporteront donc une partie cohérente et également une importante partie incohérente. La partie cohérente résiste à la moyennes sur plusieurs réalisations indépendantes du désordre, c'est à dire plusieurs configurations de position, quantité, forme et taille de granulats. Ces réalisations indépendantes du désordre sont en pratique obtenues en répétant la même mesure en différents endroits du béton, en conservant les mêmes natures de sources et de récepteurs. Ce champ cohérent correspond donc à un milieu homogène dit « milieu effectif » [7]. La partie incohérente ne résiste pas au calcul des moyennes. Elle est constituée d'arrivées tardives des ondes ayant été multiples diffusées par les granulats et est spécifique de la configuration en positions, formes et dimensions de granulats rencontrés au cours de la propagation.

MESURES EXPERIMENTALES

Corps d'épreuves

On dispose de 4 séries de bétons différents, chaque béton se différencie des autres par son rapport E/C ou le diamètre maximal D_{max} de ses granulats. A ces 4 séries s'ajoutent 2 séries de mortiers (béton sans granulats) de même composition que celui utilisé pour la réalisation des dalles de bétons. Les différentes séries sont présentées dans le tableau 1.

	E/C = 0.35	E/C = 0.65
Dmax = 20 mm	B1	B2
Dmax = 10 mm	B3	B4
Mortier (Dmax= 4 mm)	B5	B6

Tab. 1 – Caractéristiques des bétons étudiés

Chaque série de bétons est composée de 5 dalles de dimensions $60cm \times 60cm \times 12cm$, ainsi que d'éprouvettes cylindriques destinées au contrôle destructif en vue de vérifications. Les dalles et les éprouvettes ont subi une cure de 90 jours après le moulage pour laisser au béton le temps d'acquies des propriétés mécanique stables.

Pour garantir une teneur en eau de quasiment 100% dans les dalles, les dalles sont stockées dans des bacs d'eau additionnée de chaux. Elles sont sorties de l'eau juste avant les mesures et sont réimmergées une fois les mesures terminées. La variation de teneur en eau due à l'évaporation au cours de la durée de la mesure (quelques heures) est négligeable.

Dispositif expérimental

Les ondes de Rayleigh sont générées avec un transducteur piézoélectrique (Imasonic). Le transducteur émet des ondes de compression et est équipé d'un « sabot » qui permet l'incidence de l'onde émise avec le béton à un angle favorisant la conversion en onde de Rayleigh. Le sabot est couplé au béton avec du Gel D (Sofranel) posé sur une bande adhésive (type « scotch »). La bande adhésive évite au gel de pénétrer dans le béton au cours de la mesure, et permet un positionnement plus aisé du transducteur. La fréquence centrale du transducteur est de 120 kHz. Il est excité par une ondelette de Ricker amplifiée par un amplificateur à porte (Ritek gated RF amplifier). La bande de fréquence des ondes de Rayleigh générées varie de 60 à environ 180 kHz.

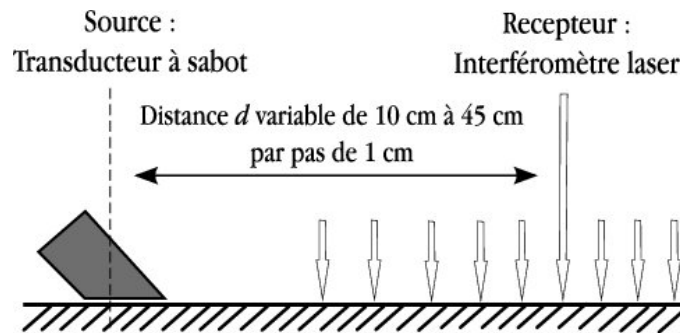


Fig 1 – Dispositif expérimental

La réception est effectuée à l'aide d'un interféromètre laser (sonde Tempo de BossaNova Tech.). Il permet une acquisition ponctuelle et sans contact du déplacement normal de la

surface du béton. Une bande réfléchissante est placée sur le béton afin d'éviter d'avoir à polir les dalles et améliorer la réception. Le laser est monté sur un banc de pilotage automatique permettant de le déplacer et de le positionner au micromètre près.

L'acquisition se fait le long d'une ligne dans le prolongement du transducteur, on mesure le déplacement normal de la dalle pour des distances de propagation variant de 10 cm à 45cm, par pas de 1cm; l'ensemble du profil contient donc 36 signaux. La figure 1 présente un schéma du dispositif expérimental. Ce dispositif est similaire aux mesures multistations dites « tirs sismiques » en géophysique. Afin de réduire le rapport signal à bruit, chaque signal mesuré est moyenné sur 256 acquisitions.

Pour obtenir les différentes réalisations indépendantes du désordre nécessaires à l'évaluation du champ cohérent, des profils du type de celui présenté en figure 1 sont réalisés plusieurs fois à différents endroits des dalles de béton. 9 profils parallèles sont mesurés sur chaque face des dalles, chaque série de béton comportant 5 dalles, cela fait un total de 90 profils par série. La moyenne spatiale de ces 90 réalisations du désordre nous donne une évaluation d'un profil « cohérent », décrivant les propriétés d'un béton homogène équivalent.

Traitements des mesures

La vitesse de phase $V\varphi(\omega)$ est déterminée à partir d'un profil en utilisant la transformée p - ω . Cette méthode est basée sur la méthode dite de « sommation oblique » en domaine temporel [8], reformulée dans le domaine fréquentiel par Mokhtar (1988) [9]. Elle diffère de la transformée de Fourier spatiale par l'utilisation de la lenteur $p_0(\omega) = 1/V\varphi(\omega)$ comme paramètre, ce qui réduit les erreurs lors du calcul.

Dans le domaine fréquentiel, le champ cohérent s à la fréquence ω et à la distance de propagation d_j peut s'écrire de la manière suivante;

$$s(\omega, d_j) \cong A(\omega, d_j) e^{-i p_0(\omega) d_j} \quad (1)$$

où $A(\omega, d_j)$ représente l'amplitude spectrale du champ cohérent à la distance d_j .

La transformée p - ω s'écrit alors pour une valeur quelconque de p :

$$\hat{s}(\omega, p) \cong \sum_{j=1}^N A(\omega, d_j) e^{i(p - p_0(\omega)) d_j} \quad (2)$$

Ce calcul est effectué pour plusieurs valeurs du paramètre de ray p . Pour une fréquence donnée, le maximum du module $|\hat{s}(\omega, p)|$ est atteint lorsque $p = p_0(\omega)$. On en déduit ainsi la courbe de dispersion.

Le facteur d'amortissement est déduit de la décroissance de l'amplitude spectrale du champ cohérent avec la distance de propagation. Dans le domaine fréquentiel, on suppose que l'amplitude spectrale de l'équation (1) prend la forme suivante:

$$A(\omega, d_j) \cong A_0(\omega) e^{-\alpha(\omega) d_j} \quad (3)$$

où $A_0(\omega)$ représente l'amplitude initiale de s pour $d_j=0$. Le facteur d'amortissement $\alpha(\omega)$ est déterminé par la pente de la droite des moindres carrés du logarithme népérien $\ln(A(\omega, d_j))$. L'amortissement géométrique des ondes de surfaces est auparavant corrigé en multipliant les signaux par $\sqrt{d_j}$.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

On présente les résultats des traitements sur la série de béton B2 (voir Tab.1), qui présente les caractéristiques les plus pénalisantes pour l'étude des ondes de surfaces ; des granulats de grandes dimensions ($D_{\max} = 20$ mm) qui produiront des effets de diffusion multiple

importants, et un fort rapport $E/C = 0.65$, qui induit une porosité du mortier plus importante et une atténuation plus importante des ondes.

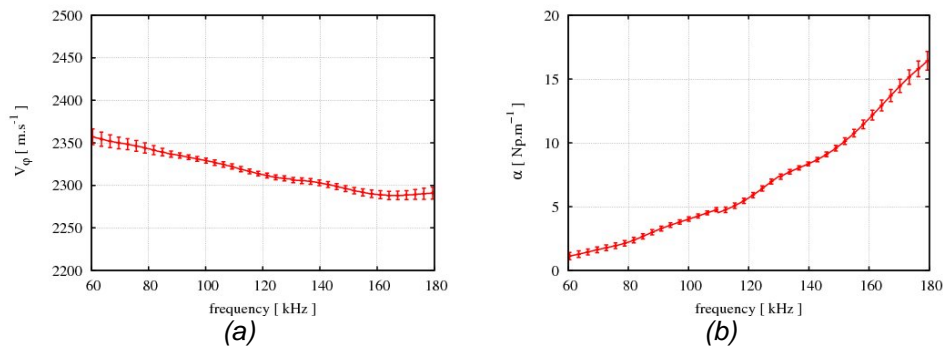


Fig 2 – Courbe de vitesse de phase (a) et d'amortissement (b) pour la série B2.

Ces résultats sont présentés en figure 2. Ils représentent les paramètres du milieu effectif pour le béton de la série B2. L'amortissement des ondes est relativement important. Cet amortissement est quasiment linéaire avec la fréquence pour les fréquences les plus basses (inférieures à 140 kHz), puis augmente plus rapidement; c'est l'un des effets de la diffusion multiple qui est plus importante à hautes fréquences et augmente l'amortissement des ondes cohérentes.

La courbe de dispersion montre que la vitesse de phase effective décroît avec la fréquence, ce qui se produit lorsque les propriétés du matériau changent avec la profondeur. Pour étudier ce gradient de propriétés, des méthodes issues de la géophysique permettent de remonter aux vitesses des ondes de volumes V_P et V_S , ainsi qu'au coefficient de poisson ν , en fonction de la profondeur, à partir des courbes de dispersion des ondes de Rayleigh.

Le modèle direct utilisé lors de l'inversion est le modèle décrit par le programme de Saito [10], qui à partir d'une distribution continue de V_P , V_S et ν en fonction de la profondeur détermine l'allure de la courbe de dispersion des ondes de surfaces. Lors de l'inversion les profils de vitesses sont supposés être continuellement variables. La méthode d'optimisation utilisée est celle de Tarantola [11], qui minimise l'erreur entre la courbe de dispersion réelle et celle calculée par le modèle direct. Le programme de Maupin [12] regroupe ces deux méthodes pour réaliser cette inversion et a été modifié pour s'adapter au cas du béton.

Le problème des ondes de surface étant mal conditionné, plusieurs profils de vitesses peuvent correspondre à la courbe de dispersion mesurée. La solution n'étant pas unique, plusieurs modèles initiaux de profil de vitesse sont choisis, qui convergent vers plusieurs solutions différentes, toutes correspondant à la courbe de dispersion mesurée. Ces « familles » de résultats donnent une estimation du gradient de propriétés réel du matériau.

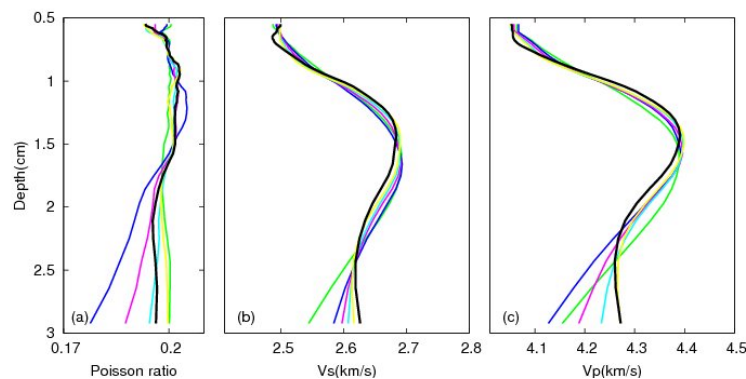


Fig.3 – Profils de vitesses et coefficient de poisson en fonction de la profondeur pour la série B2 obtenus à partir de 6 modèles initiaux différents.

Des profils de vitesse et de coefficients de poisons obtenus par inversion de la courbe de dispersion sont présentés en figure 3, pour 6 modèles initiaux différents. Les courbes de dispersion des ondes de Rayleigh correspondant à ces six solutions sont présentées en figure 4.

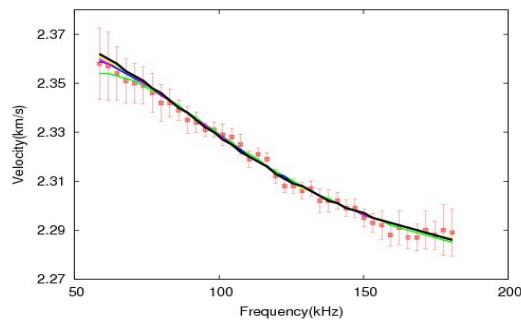


Fig. 4 – Courbes de dispersions des ondes de Rayleigh correspondant aux solutions de la figure 3 après inversion. La courbe en points rouge représente les mesures expérimentales.

Les 6 modèles initiaux donnent des résultats comparables pour la vitesse des ondes de cisaillement V_S . Pour les ondes de compression V_P et le coefficient de poisson, en dessous de 2 cm de profondeur, les résultats varient énormément et l'incertitude est plus grande. Ces résultats montrent bien l'existence d'un gradient de propriétés non négligeable sur 1 à 1,5 cm en surface du béton. Ces gradients peuvent avoir pour origine une distribution de granulats moins dense en surface qu'au cœur du béton, ou encore une porosité plus importante en surface.

CONCLUSIONS

Le béton étant un matériau très hétérogène, les mesures du champ cohérent d'ondes de Rayleigh sur des dalles de béton nécessitent l'acquisition de nombreuses réalisations du désordre, afin d'estimer les propriétés d'un milieu homogène effectif. Pour cela l'utilisation d'un interféromètre laser s'avère indispensable pour pouvoir répéter de nombreuses fois la mesure de façon fiable et précise. Des techniques de traitement du signal issues de la géophysique permettent d'évaluer les courbes de dispersion et d'amortissement correspondant au milieu effectif à partir du champ cohérent d'ondes de Rayleigh. L'inversion de la courbe de dispersion met en évidence la présence d'un gradient de propriétés mécaniques en fonction de la profondeur. L'origine de ce gradient provient vraisemblablement d'une variation de porosité en surface ou de densité de granulats et reste à déterminer. Cette étude montre l'intérêt de l'utilisation d'ondes de surfaces, qui avec des traitements appropriés relatifs aux hétérogénéités du matériau, permet de remonter aux propriétés mécaniques des tous premiers centimètres du béton d'enrobage.

Par la suite les autres séries de béton listées au tableau 1 seront traitées de la même manière, afin de pouvoir comparer les bétons entre eux en fonctions de leurs caractéristiques, et de dégager des observables pertinentes en vue d'un diagnostic pour du contrôle non destructif. Il sera notamment important de comparer les résultats entre les mortiers (sans granulats) et les bétons ayant des granulats de dimensions importants, comme on peut en trouver sur des ouvrages réels, afin de quantifier l'influence de ces granulats sur les résultats.

Parallèlement, ces résultats pourront être comparés à des modèles théoriques d'homogénéisation semi-analytiques, traitant de la diffusion multiple, tels que l'*Independent Scattering Approximation* (ISA). Ces modèles sont basés sur le calcul des paramètres effectifs de la propagation (vitesse de phase et atténuation) à partir des propriétés des hétérogénéités (les granulats) d'une part, et du mortier d'autre part.

Le processus d'inversion des courbes de dispersion pour remonter aux profils de vitesse en fonction de la profondeur sera également amélioré, notamment par la prise en compte de l'atténuation au cours de l'inversion, qui permettra de contraindre un peu plus le problème et de réduire les variations entre les différents résultats de l'inversion. La variation de masse volumique du béton en fonction de la profondeur pourra également être prise en compte.

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement la division TGCE du LCPC pour la réalisation des dalles de béton, Alain Le Brun (EDF R&D) pour le financement d'une partie de ces travaux, et Arnaud Derode (LOA-ESPCI) pour ses conseils sur la diffusion multiple.

Références bibliographiques

- [1] P.E. Grattan-Bellew, « Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes », *Construct. Build. Mat.* **10**(1), 3-16 (1996)
- [2] A Raharinaivo *et al*, « La corrosion et la protection des aciers dans les bétons », *Presse des Ponts et Chaussées* (1998)
- [3] G. Villain, X. Deroberts, O. Abraham, M. Chekroun, O. Coffec et O. Durand, « Complémentarité de techniques non destructives pour déterminer les propriétés de différents bétons hydrauliques ». Actes des journées Cofrend 2008, Toulouse, France, Mai, 2008.
- [4] E.N. Landis and S.P. Shah, « Frequency dependent stress wave attenuation in cement based materials », *J. Eng. Mech. - ASCE* **121** (6), 737 – 743 (1995)
- [5] L.J. Jacobs and J.O. Owino, « Effect of aggregate size on attenuation of rayleigh surface weves un cement damaged materials » *J. Eng. Mech -ASCE* **126** (11) 1124-1130 (2000)
- [6] S. Ould Naffa, M. Goueygou, B. Piwakowski and F. Buyle-Bodin, « Detection of chemical damage in concrete using ultrasound ». *Ultrasonics*, **40**, 247-251 (2002).
- [7] A. Derode, A Tourin and M. Fink, « Random multiple scattering of ultrasound: I. Coherent and ballistic waves », *Phys. Rev E* **64**, (2001)
- [8] G.A. Mechan and M.J. Yedlin, « Analysis of dispersive waves by wave field transformation », *Geophysics* **46** (6), pp 869-874 (1981).
- [9] T.A. Mokhtar, R.B. Herrmann and D.R Russell, « seismic velocity and Q model for the shallow structure of the Arabian shield from short period Rayleigh waves », *Geophysics*, **53** (11), pp 1379-1387 (1988).
- [10] M. Saito, « Seismological Algorithms », ed. Doornbos, D.J., Academic Press, Sandiego (1988)
- [11] A. Tarantola and B. Valette, « Generalized nonlinear inverse problem solved using the least squares criterion », *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **20**:219-C232. (1982)
- [12] V. Maupin and M. Cara, « Love-rayleigh wave incompatibility and possible deep upper mantle anisotropy in the iberian peninsula. » *Pure and Applied Geophysics*, **138**:429-C444., (1992)