

CARACTÉRISATION DE BÉTON PAR ONDES RÉTRODIFFUÉSÉS

CONCRETE CHARACTERISATION BY BACKSCATTERED WAVES

GARNIER V., CHAIX J.F., MORIERES S.

LCND, IUT Aix-en-Provence, Avenue Gaston Berger, 13625 Aix-en-Provence Cedex

Tél. 04 42 93 90 52 – Fax. 04 42 93 90 84

E-mail : vincent.garnier@univmed.fr

Résumé

Dans le cadre du contrôle de structure de génie civil, l'objectif du « Laboratoire de Caractérisation Non Destructive » est le contrôle in situ. La première phase du travail est de maîtriser les moyens expérimentaux et les observables ultrasonores sensibles aux évolutions de la microstructure face à certaines pathologies. Leurs variations sont calculées par des modèles de propagation. La multidiffusion, l'acoustique non linéaire et les ondes rétrodiffusées sont étudiées dans ce contexte.

Plus spécifiquement, les ondes rétrodiffusées sont porteuses de bruits liés aux différentes interactions ondes-diffuseurs. Les modèles et les expériences montrent que cette technique simple de mise en oeuvre peut être une réponse à la connaissance du béton en surface. L'étude présentée a pour but d'améliorer la description de la rétrodiffusion des ondes ultrasonores en s'appuyant sur un modèle proposé par Saniï. Elle a aussi pour objectif l'optimisation de la procédure et l'exploitation de mesures dans le cadre d'essais réalisés dans le projet ANR SENSO en laboratoire puis in situ. Un transducteur spécifique à émission et réception séparées est mis en oeuvre. L'incertitude de la mesure est évaluée dans le cas d'essais en immersion et au contact. La méthode d'exploitation est validée puis mise en oeuvre pour des mesures sur une poutre d'une structure portuaire.

Abstract

In Civil Engineering structure control, the objective of the "Laboratoire de Caractérisation Non Destructive" is to test in situ. The first phase of the work is to control the experimental devices and the ultrasonic indicators sensitive to the microstructure evolution with some pathologies. Their variations are calculated by propagation models. Multiple scattering, non linear acoustics and the backscattered waves are studied in this context.

More specifically, the backscattered waves give information linked with the different waves-scatterers interactions. The models and the experiments show that this simple technique can be an answer to the surface concrete knowledge. The study presented is aimed at improving the description of the ultrasonic waves backscatter based on a model proposed by Saniï. It also has the objective to optimise the procedure and the exploitation of measurements within the scope of tests realised in the ANR project SENSO in laboratory then in situ. A specific transducer with separated emission and reception is developed. The measure uncertainty is evaluated in the case of immersion and contact tests. The exploitation method is validated then applied for measurements on a beam in a port structure.

INTRODUCTION

Le contrôle du béton des structures de Génie Civil a pour objectif de déterminer de nombreuses évolutions du matériau qui peuvent être chimiques, micro structurelles ou macro structurelles. Pour une exploitation optimale des données, la connaissance et la maîtrise des techniques utilisées doivent se faire expérimentalement mais aussi analytiquement aussi bien dans le cas d'essais en laboratoire que in situ.

Dans le cas du contrôle ultrasonore du béton, les ondes qui se propagent subissent un ensemble de phénomènes liés à la divergence géométrique du faisceau, à la dispersion sous forme de chaleur due à la viscosité du matériau et à la diffusion par interaction avec l'ensemble des diffuseurs qu'elles rencontrent. Ces diffuseurs sont les granulats, les grains de sables, les fissures et les microfissures voire les barres de renfort.

Suivant la longueur d'onde λ exploitée au regard de la taille des diffuseurs d , les interactions peuvent être classées en trois domaines qui sont dits de Rayleigh pour $\lambda \gg d$, stochastiques pour $\lambda \approx d$ et géométrique pour $\lambda \ll d$. Dans le contrôle du béton, les longueurs d'ondes générées sont de l'ordre de 100 mm à moins de 5 mm. La propagation peut donc se situer dans le domaine stochastique pour lequel les phénomènes de diffusion peuvent être importants. En se limitant à ce dernier phénomène qui modifie la vitesse et l'atténuation des ondes dans l'espace et pour le cas d'une impulsion donnée à un transducteur ultrasonore de fréquence adaptée, l'énergie du faisceau peut être transférée en ondes transmises cohérentes, en ondes transmises incohérentes ainsi qu'en ondes rétrodiffusées.

La partie cohérente peut être analysée par différents modèles d'homogénéisation dont les limites d'exploitation peuvent être définies [1]. Il est alors possible de définir un matériau homogène équivalent. La partie incohérente dite coda est analysée par différentes méthodes. La constante de diffusion du matériau peut en être déduite [2] ou encore les paramètres acousto-élastiques peuvent en être extraits [3].

La dernière contribution de la propagation des ondes dans le béton que l'on peut exploiter est la partie rétrodiffusée des ondes. Elles ont déjà été exploitées dans le cas du béton pour évaluer l'endommagement thermique [4], [5]. Ces ondes, qui perturbent l'information dans le cas de l'enregistrement de signaux ultrasonores, sont souvent étudiées pour être supprimées [6] et faciliter l'accès à l'information recherchée.

Dans notre étude la démarche est l'inverse. C'est-à-dire nous travaillons sur les informations que portent les ondes rétrodiffusées, qui sont liées à la nature et l'état du matériau. La présence naturelle de nombreux diffuseurs de taille équivalente à la longueur d'onde dans le béton favorise leur génération ainsi que leur exploitation. L'objet de ce travail est de mieux maîtriser les différentes possibilités de cette technique tant sur l'aspect génération que réception qu'analyse et traitement de l'information avec l'objectif de l'application sur site.

Ondes rétrodiffusées

Le principe de la génération des ondes rétrodiffusées est expliqué par la figure 1. Les granulats et les fissures ou les porosités du béton sont autant de diffuseurs potentiels et chaque partie d'onde génère beaucoup d'informations rétrodiffusées. L'onde est émise par un transducteur ultrasonore usuel et peut être reçue par le même transducteur. Chaque contribution vient se sommer aux autres et l'ensemble constitue l'onde analysée. Dans le cas du béton les granulats peuvent ne servir que de réflecteur et l'information recueillie est l'atténuation de l'onde sur la distance parcourue dans le matériau. Cette distance est reliée au temps. Cette technique peut être mise en œuvre en immersion ou au contact. Cette simplicité de mise en œuvre de l'auscultation permet d'envisager des potentialités importantes de contrôle in situ.

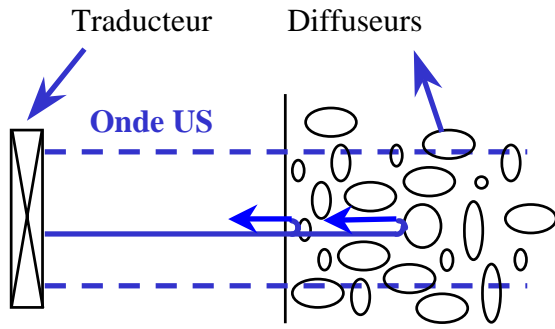


Figure 1 : Ondes rétrodiffusées dans le béton

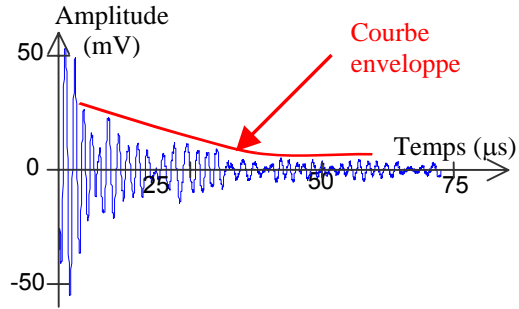


Figure 2 : Signal rétrodiffusé simulé et enveloppe

Le lien de l'amplitude et de l'atténuation du bruit rétrodiffusé avec les tailles et les densités des désordres ou diffuseurs dépendant du matériau et de son état de santé.

Une modélisation a été proposée [7] sur la base des travaux de Sanie [8]. Le signal rétrodiffusé $r(t)$ reçu par le traducteur peut être assimilé à la fonction

$$r(t) = u_0 \cdot e^{-\alpha \cdot C \cdot t} \cdot \sum_{k=1}^M \sigma_k \cdot e^{i \cdot \phi_k}$$

dans laquelle, u_0 est l'amplitude initiale de l'onde, α est le coefficient d'atténuation des ondes rétrodiffusées, C est la vitesse des ondes ultrasonore dans le béton, t est le temps, M est le nombre de diffuseur, σ_k correspond à la section de diffusion qui dépend des caractéristiques du diffuseur et $\phi_k = \omega \cdot (t - \tau_k)$ est la position temporelle du diffuseur. En s'appuyant sur le fait que le signal est en champ lointain et que les diffuseurs sont aléatoirement distribués en section de diffusion, il est possible d'approximer la décroissance exponentielle $-\alpha \cdot C \cdot t$ de la courbe par une enveloppe figure 2 à condition que la distribution des diffuseurs soit aléatoire. La connaissance de la valeur de la vitesse C conduit alors à déterminer le coefficient d'atténuation de l'onde rétrodiffusée α qui est l'observable que nous retenons pour les travaux développés dans cette étude.

Dans le cas de plusieurs types de diffuseurs, nous pouvons introduire des fonctions de diffusion attachées à chacun deux. Pour exemple, dans le cas de l'endommagement par fissuration, nous pouvons proposer :

$$r(t) = u_0 \cdot e^{-\alpha \cdot C \cdot t} \cdot \left(\sum_{k=1}^M \sigma_{sk} \cdot e^{i \cdot \phi_k} \sum_{j=1}^{M'} \sigma_{sj} \cdot e^{i \cdot \phi_j} \right)$$

où la première somme correspond à la diffusion liée à la composition (granulats de section de diffusion σ_{sk}) et la seconde à la diffusion liée à l'endommagement (fissures de section de diffusion σ_{sj}).

A partir d'une démarche d'inversion fondée sur le crime inverse, il a été montré que la plage de profondeurs et fréquences exploitables est de 140 mm pour une fréquence de 500 kHz et de 40 mm pour 2,5 MHz dans un béton sain. Ces dimensions indiquent qu'il est possible d'ausculter le béton de peau qui est la principale barrière aux agressions du béton. Une étude expérimentale menée sur des échantillons endommagés thermiquement par un maintien en température dans un gamme variant de 20 °C (non endommagé) à 200 °C (fortement endommagé), a montré la forte sensibilité du coefficient d'atténuation déduit des ondes rétrodiffusées à l'endommagement d'un béton.

La prise en compte de l'atténuation en fonction de la fréquence [9] dans le cas d'un béton de type endommagé simulé par une matrice incluant 30 % de billes d'air de diamètre 2.8 mm a montré que la modélisation peut être sensiblement améliorée pour converger vers la valeur théorique de l'atténuation.

Dans cette étude, nous nous limiterons à étudier les améliorations apportées aux différents niveaux de la mesure et de l'analyse des ondes rétrodiffusées.

Génération - réception

L'émission des ondes est assurée par des transducteurs standards de 1 MHz ou de 2,25 MHz. Leurs diamètres de 1 pouce font que leurs faisceaux sont du même ordre de grandeur que la taille du faisceau hors champs proche. Dans ce cas la prise en compte d'une distribution aléatoire des diffuseurs nécessite de travailler sur le moyennage de plusieurs signaux obtenus sur une zone prospectée telle que les signaux soient globalement décorrélés.

La génération des signaux peut se faire à partir d'un transducteur ultrasonore usuel en émission réception à pastille unique ou à partir de transducteur spécifique composé de deux pastilles concentriques telle que le montrent la figure 3.

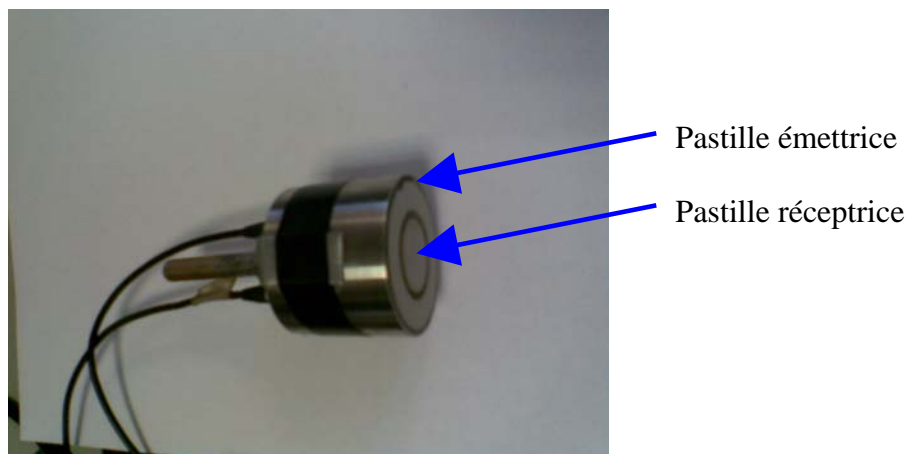


Figure 3 : Transducteur à émetteur-récepteur séparés

Pour le transducteur à une seule pastille, les vibrations de la cellule piezo électrique lors de l'émission perturbent les ondes rétrodiffusées enregistrées sur une durée du signal. Il faut éliminer cette zone morte lors du traitement ultérieur de la partie décroissante du signal comme le montre la figure 4.

Le transducteur émetteur-récepteur séparés permet de n'enregistrer que les informations issues de la rétrodiffusion. La pastille extérieure en forme de disque est l'émetteur et la pastille intérieure est le récepteur. Les deux pastilles isolées phoniquement n'interfèrent pas et seules les ondes diffusées par les granulats ou fissures sont réceptionnées par le récepteur. Il est alors possible d'augmenter considérablement le gain et de travailler sur un signal tel que proposé en figure 5.

La difficulté est que le faisceau émis est biconique et par la même le temps d'arriver sur la pastille réceptrice dépend de la profondeur de l'interaction faisceau – diffuseur. L'exploitation du signal nécessite d'éliminer un temps suffisant pour que le signal rétrodiffusé soit issu d'un volume diffusant représentatif du matériau et toujours équivalent. Cette zone morte éliminée autorise de travailler alors sur la partie décroissante du signal rétrodiffusé.

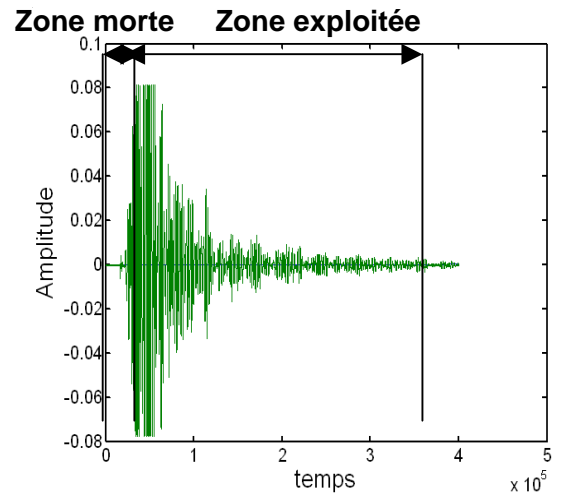
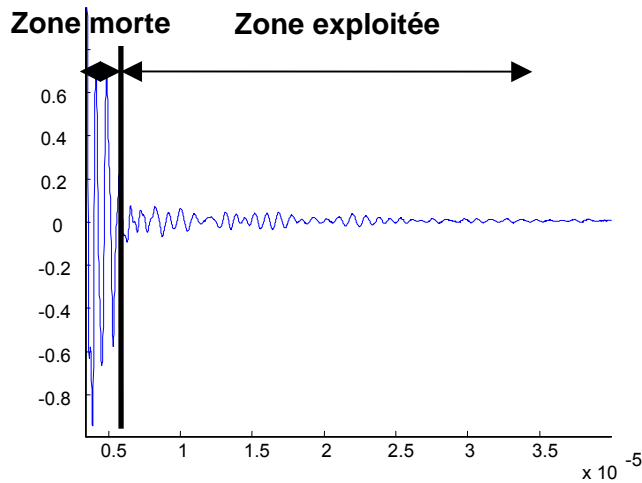
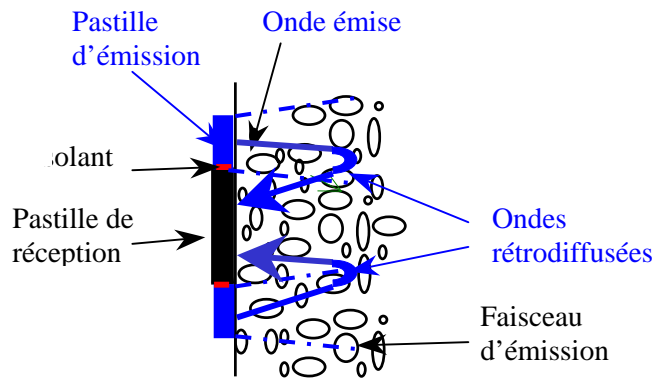
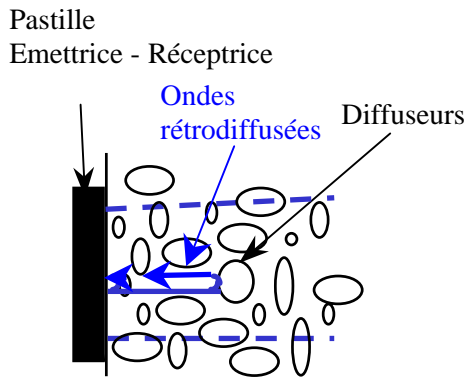


Figure 4 : Faisceau rétrodiffusé
 Traducteur : à pastille unique

Figure 5 : Faisceau rétrodiffusé
 à émetteur-récepteur séparés

Pour les deux types de traducteurs, les zones inexploitable sont du même ordre de grandeur. Par contre l'amplitude du signal dans le cas de la figure 4 est nettement plus importante et le bruit ainsi que les porteuses électroniques produits à la génération sont inexistantes.

Les caractéristiques détaillées des traducteurs sont données dans le tableau 1.

Transducteur	Fréquence Nominale (KHz)	Bande passante (kHz)		Diamètre de l'élément actif
		à -6 dB	à -12 dB	
Pastille unique	1000	630-1270	500-1400	1 pouce (= 25,4 mm)
Emetteur-récepteur séparés	1000	829-1185	576-1328	Emission anneau Int 24mm ext. 40mm Réception disque □20mm

Tableau 1 : caractéristiques des capteurs

Caractérisation de la mesure

Le béton est un milieu hétérogène, selon le moyen de mesure utilisé le volume inspecté est plus ou moins grand et l'information obtenue tend à décrire le matériau de façon locale ou homogénéisée. Les contrôles effectués dans le cadre de cette étude sont des contrôles locaux sur un volume restreint de béton. Le faisceau émis possède un diamètre d'environ 6mm en champ proche, cette grandeur est de l'ordre de la taille de certains diffuseurs. Les mesures sont traitées afin d'obtenir une valeur "représentative" du milieu. Il faut donc définir le nombre de mesures utiles pour caractériser effectivement le matériau. L'observable analysé est le coefficient d'atténuation α défini précédemment.

Dans un premier temps, nous étudions la normalité de la mesure sur la base de vingt six mesures effectuées en des points physiquement indépendants sur une éprouvette de béton parallélépipèdes de 50x25x12 cm³. Nous avons quantifié les intervalles de tolérance dans lesquelles se situent les valeurs moyennes obtenues.

La première étape est de rechercher la distribution de la moyenne d'une série de signaux rétrodiffusés dans le béton. Sur la base des 26 essais, nous prenons 200 combinaisons de n mesures (de 3 à 16) dont nous déterminons la moyenne et l'écart type σ . L'évolution de valeurs expérimentales obtenues est comparée, figure 6, à l'évolution des valeurs théoriques (σ/\sqrt{n}) connue dans le cas d'une loi normale.

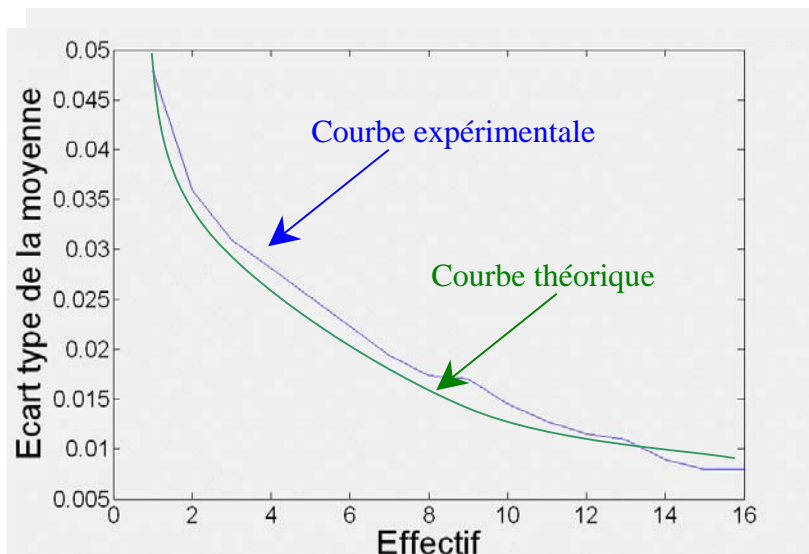


Figure 6 : Dispersion de la moyenne en fonction de nombre de mesures (effectif)

L'écart entre les deux courbes ne dépasse pas 9 %. Nous admettons la normalité de la distribution de la moyenne d'une série de signaux rétrodiffusés dans le béton et ainsi nous pouvons estimer une valeur moyenne et un écart type représentatifs à partir d'essais sur un volume défini du béton et d'un nombre de signaux indépendants déterminés.

Pour les essais sur site, un premier moyennage local sera réalisé par balayage circulaire sur une zone de diamètre égal à au moins 2,5 fois celui du traducteur. Le moyennage se fait en continue sur la base de 100 signaux. Les moyennes et écarts types seront déterminés sur un volume de béton limité par la taille des mailles des armatures à partir de 9 essais.

La deuxième étape consiste à comparer les essais réalisés à l'aide des deux traducteurs dans les cas de contrôles par immersion caractéristiques de tests de laboratoire ou par contact généralement utilisés sur site et à définir la variabilité spatiale locale à l'échelle d'une éprouvette.

Dans les deux cas, nous travaillons sur la base de 24 essais sur l'éprouvette parallélépipédique. Les essais au contact sont assurés par un couplage à la graisse.

Les moyennes et écarts types issus de ces mesures sont présentés dans le tableau 2

Détermination de α en Np/m	moyenne	écart type
Traducteur ER_Séparés contact	92,4	8,2
Traducteur ER_Séparés immersion	45,8	21,7
Traducteur pastille unique contact	118,6	25,5
Traducteur pastille unique immersion	108	9,7

Table 2 : Essais de caractérisation de la mesure de l'atténuation des ondes rétrodiffusées.

Les résultats montrent que, hormis le travail en immersion du traducteur émetteur-récepteur séparés, les valeurs moyennes sont proches et qu'en tenant compte des écarts types, elles se recoupent. En immersion, le traducteur émission-réception séparées n'est pas exploitable en raison de la morphologie du faisceau dont la structure n'est pas maîtrisée et donc entre autre de la difficulté de réglage de la distance de travail pièce traducteur.

Par ailleurs, les résultats montrent que les deux types de traducteurs ont des comportements opposés. Le traducteur à pastille unique est exploitable en travail par immersion et avec pas de difficulté au contact, alors qu'à l'inverse le traducteur à émission-réception séparées présente une bonne reproductibilité de la mesure dans le cas des travaux par contact.

En tenant compte des coefficients de Student défini pour une loi de distribution normale, nous pouvons estimer à 11 % l'incertitude de mesure pour une exploitation de 22 essais décorrélés et de 16 % pour l'exploitation de 9 essais.

Analyse du signal

Pour ce travail inscrit dans le cadre du programme SENSO, nous avons étudié plus spécifiquement l'influence du taux de saturation en eau et de la porosité du matériau sur ce coefficient d'atténuation et nous montrons l'importance de la méthode d'analyse proposée sur la fiabilité de la mesure.

Les éprouvettes testées sont des parallélépipèdes de 50x25x12 cm³. Six gâchées sont réalisées et six éprouvettes sont testées par gâchées. Chaque gâchée a un rapport E/C (eau/ciment) spécifique de façon à obtenir une porosité différente. Les essais sont réalisés sur 3 points de chaque éprouvette de chaque gâchée en réalisant pour chaque point un moyennage spatiale local comme défini précédemment. Pour chaque éprouvette, nous moyennons les 3 signaux rétrodiffusés. Nous déduisons de ce signal moyenné la valeur de l'atténuation de l'onde rétrodiffusée en appliquant la méthode de l'enveloppe. Nous pouvons donc déduire une moyenne par gâchée et un écart type sur les six éprouvettes. Ces données représentent la variabilité spatiale non plus à l'échelle locale du matériau, mais à l'échelle globale d'une gâchée. Pour les essais présentés, le traducteur choisi est à pastille unique de fréquence centrale 2,25 MHz. Le couplage est par contact. Il est rendu difficile par le fait qu'il ne faut pas apporter d'eau ou de graisse au béton pour des raisons de conservation et d'homogénéité des éprouvettes. Nous avons donc placé une couche

protectrice adhésive à la surface de l'échantillon avant chaque essai. Les résultats sont présentés par la figure 7.a dans les deux états de référence sec 0% et saturé 100%.

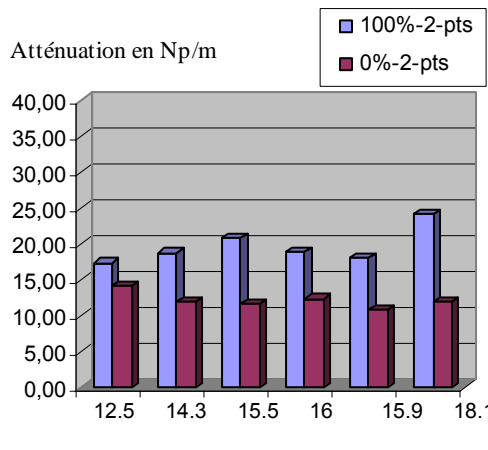


Figure 7.a : Coefficient α : moyennage temporelle

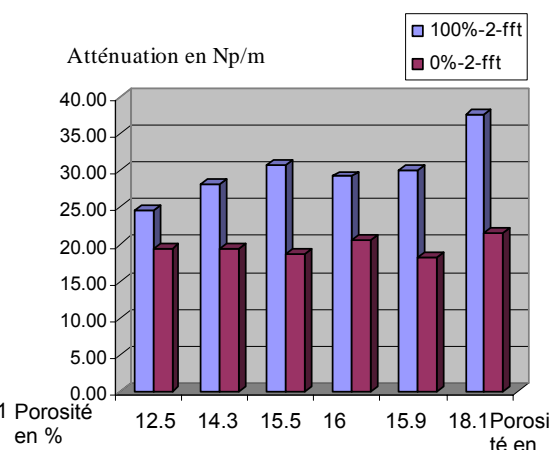


Figure 7.b : Coefficient α : moyennage fréquentielle

Les résultats montrent une variation importante du coefficient d'atténuation des ondes rétrodiffusées entre les deux cas de référence de la saturation à 0 et 100%. Par contre ce coefficient est peu dépendant de la porosité pour le béton sec et montre un accroissement avec la porosité pour le cas des éprouvettes saturées.

Il est important de noter que ces valeurs présentent un coefficient de variation (écart type/moyenne) par gâchée qui peut être très important (de 0.03 à 0.4). Ce phénomène est attendu en raison de la présence potentielle (ou non) d'un granulat ou d'un vide sous la surface et du manque d'homogénéité potentielle du béton. La moyenne des coefficients de variation ainsi obtenus sur l'ensemble des gâchées est de 0.11 et 0.14 pour le cas saturé et sec. Pour limiter ces valeurs, nous proposons un moyennage différent des trois signaux par éprouvette. En effet, le moyennage temporel simple des signaux n'est possible qu'à condition que le couplage soit maîtrisé. Un couplage fluctuant peut engendrer un déphasage initial du signal. Au pire les signaux peuvent être en opposition de phase et s'annuler partiellement. Il convient de moyennner les signaux dans l'espace fréquentiel afin de travailler sur le module du vecteur d'onde.

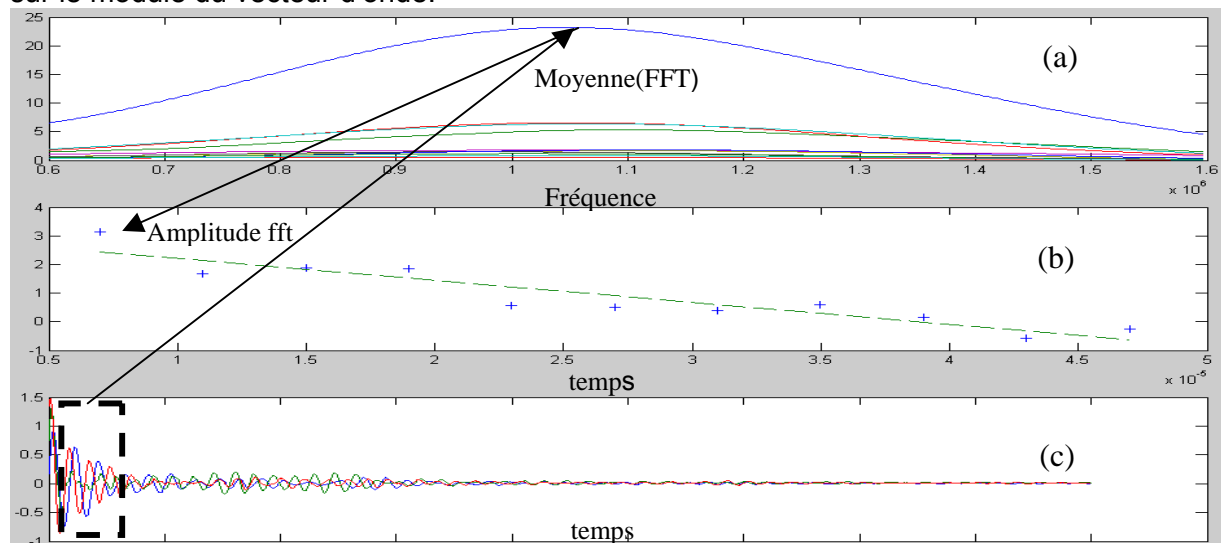


Figure 8 : Moyennage fréquentiel des trois signaux rétrodiffusés par éprouvette :
 a = FFT des points d'analyse. b = amplitude de la fréquence maximale en fonction du temps.
 C = Signaux temporels et fenêtre glissante d'analyse.

Les amplitudes ainsi moyennées sur une fenêtre judicieusement choisie permettront de limiter les effets du couplage. Le principe de ce traitement est proposé par la figure 8. Les trois signaux d'une éprouvette figure 8c sont analysés par une FFT sur une durée choisie par une fenêtre encadrée en pointillé. Celle-ci subit un décalage temporel 11 fois. Chaque FFT est visualisée en figure 8a et l'amplitude maximale est déterminée à partir de cette figure pour être portée sur la figure 8b à la position temporelle moyenne de la fenêtre. Il devient simple alors de déterminer le coefficient α en connaissant la vitesse des ondes ultrasonores. Les résultats portés en figure 7.b montrent que la valeur absolue des coefficients d'atténuation évolue au regard des résultats de la figure 7.a, mais les variations relatives sont équivalentes et c'est ce qui est le plus important dans le cas des essais sur site. Enfin les coefficients de variation obtenus sur l'ensemble des gâchées sont de 0.05 et 0.08 pour le cas saturé et sec. Ils sont deux fois plus faibles que ceux obtenus précédemment.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les ondes rétrodiffusées sont porteuses d'information liée à la structure et à la composition du matériau. Leur mise en œuvre est simple et elle demande des méthodes d'exploitation facile à mettre en place. Nous nous sommes attachés à analyser la chaîne de mesure en travaillant sur les aspects matériels, statistiques, traitement de l'information et sensibilité.

Nous avons montré que les essais ultrasonores par ondes rétrodiffusées et la mesure du coefficient d'atténuation de ces ondes suivent une loi normale

Nous avons comparé statistiquement deux types de transducteurs dans un contexte de laboratoire. Nous avons montré que le transducteur à émission – réception séparées présente une fiabilité plus importante dans le cas d'essais au contact tels que ceux qui peuvent être le plus facilement réalisés in situ.

Nous avons présenté les résultats d'une campagne d'essais montrant l'évolution du coefficient d'atténuation avec le taux de porosité et la teneur en eau. C'est un observable peu sensible à la porosité seule, mais beaucoup plus à la teneur en eau.

Nous avons amélioré la fiabilité de ces essais en analysant les signaux dans l'espace fréquentiel.

Les développements en cours concernent l'étude de la génération fréquentielle des ondes et de leur réponse spécifique. Des essais réalisés sur des structures réelles sont en cours d'exploitation. D'autres en cours concernent l'auscultation de pièces ayant subies certaines pathologies connues du béton.

Ce travail a été réalisé pour partie dans le cadre du projet SENSO supporté financièrement par l'Agence Nationale de la Recherche. Nous tenons à la remercier de ce soutien.

Bibliographie

[1] M. Rossat, Propagation des ondes ultrasonores dans les milieux hétérogènes, Application au contrôle non destructif de structure en béton, Thèse de Doctorat, Université de la Méditerranée, déc. 2007, 160 pages

[2] L. Le Marec and al, Towards Ultrasonic Multiple Scattering Propagation for Non Destructive Evaluation of Concrete, NDTCE Proceedings, St Louis, USA, Août 2006

[3] C.Payan, V. Garnier, Coda wave interferometry for stress monitoring in concrete - 10ième IWNEM, Taormina (Sicile), 24-30 juillet 2005

[4] J.F. Chaix, Caractérisation non destructive de l'endommagement de bétons - Apport de la multidiffusion ultrasonore, Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée, 2003, 172 pages.

[5] J.V.Fuente, L. Vergara, J. Gosalbez, R. Miralles, Time-frequency analysis of ultrasonics backscattering noise for non destructive characterisation on cement pastes, In proceedings, 8 pages, 8th ECNDT Barcelona 2002

[6] J.L. Rose, P Karpur, V.L. Newhouse, Utility of split-spectrum processing in ultrasonic nondestructive evaluation, Materials Evaluation, n°46, 1988, pp. 114-122.

[7] J.F. Chaix, V. Garnier, G. Corneloup, Concrete damage evolution analysis by backscattered ultrasonic waves, *NDT&E International*, Vol. 36, 2003, pp. 461-469

- [8] J. Saniie, T. Wang, N.M. Bilgutay, Statistical evaluation of backscattered ultrasonic grain signals, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 84, No. 1, 1988, pp. 400-408.
- [9] S. Morières, *Caractérisation ultrasonore des bétons par ondes rétrodiffusées*, Master recherche : mécanique, physique et modélisation, Université de la Méditerranée, sept. 2007