

Caractérisation non destructive du béton par analyses d'ondes ultrasonores

Vincent GARNIER
Jean-François CHAIX
Gilles CORNELOUP

Laboratoire de caractérisation non destructive
Université de la Méditerranée

RÉSUMÉ

L'estimation de l'endommagement et la caractérisation du béton d'une structure sont généralement réalisées par des essais mécaniques ou physico-chimiques d'échantillons prélevés. Les contrôles non destructifs doivent permettre de les réduire, voire les remplacer. Les techniques ultrasonores sont souvent envisagées, mais leur utilisation nécessite le développement d'indicateurs adaptés au problème posé. Nous proposons des solutions aux trois problèmes qui nous ont été posés. Dans le cas de la prise du béton ainsi que de l'endommagement par alcali-réaction, nous étudions l'évolution de la microstructure du matériau à partir du suivi de l'énergie et du spectre fréquentiel de l'onde. Plusieurs formes d'exploitation sont envisagées. Dans le cas de l'endommagement thermique du béton, nous travaillons à partir des ondes rétrodiffusées pour intégrer l'aspect *in situ* du contrôle. Nous développons une modélisation afin de spécifier le champ d'exploitation de ce type d'ondes dans le béton. Nous intégrons des fissures dans le modèle pour tenir compte de l'endommagement. Nous proposons des résultats d'expérience sur échantillons endommagés.

Nous concluons en présentant les perspectives d'utilisation de ces indicateurs dans le cas *in situ* et nous présentons les travaux de modélisation de propagation d'ondes qui sont en cours de développement.

DOMAINE : Ouvrages d'art – Sciences de l'ingénieur.

ABSTRACT

Damage estimation and the characterization of the a structure's concrete composing a structure are generally performed by means of mechanical or physico-chemical tests on specimen samples. A non-destructive analysis must serve to reduce, if not replace, these extracted samples. In this context, ultrasound techniques are often called for, yet their use necessitates requires developing a set of indicators adapted to the given problem. We are proposing solutions to the three problems raised. In the case of concrete setting as well as alkali reaction-caused damage, we have examined the evolution in material microstructure from monitoring both the energy and wave frequency spectrum. Several forms of application have been envisaged. In the case of thermal damage to concrete, our work has focused on back-scattered waves in order to integrate the in situ control features. We have developed a modeling approach for the purpose of specifying the field of application for this type of wave within the concrete; this approach has incorporated cracks into the model so as to take damage into account. Also provided herein are the results from an experiment carried out on damaged samples.

We conclude this article by presenting an outlook on potential uses of such indicators for in situ applications, along with ongoing wave propagation modeling developments.

FIELD: Structural engineering - Engineering sciences.

Introduction

Le béton est un matériau complexe dont le contrôle par propagation d'ondes ultrasonores nécessite dans un premier temps la mise en évidence d'indicateurs révélateurs d'un état caractéristique du matériau, puis dans un second temps la mise en œuvre industrielle de la procédure.

Dans ce contexte, nous avons étudié des paramètres, issus d'informations ultrasonores, qui évoluent avec le béton lors de la prise ou encore au cours de l'endommagement. Nous nous sommes attachés à développer des outils qui ont pour but de permettre à terme un contrôle *in situ*, voire de suivre en temps réel des phénomènes physiques.

En contrôle non destructif par ultrasons, les paramètres exploités sont issus de la mesure de la vitesse ou/et de l'atténuation. Leurs facilités apparentes de mesure ont incité au développement de corréla-

tions avec des paramètres mécaniques, entre autres, du béton. Mais les lois de propagation des ondes ultrasonores ne peuvent être appliquées d'une façon simple au cas d'un matériau hétérogène, anisotrope, viscoélastique et dispersif comme le béton. Une relation générale n'existe pas. Les mesures expérimentales qui en découlent risquent donc d'être entachées d'erreurs d'interprétation.

La vitesse des ondes ultrasonores évolue en fonction de nombreux paramètres tels que la nature et la quantité des constituants, l'âge du béton, son endommagement, l'état de contrainte dans la structure, le ferrailage, le taux d'humidité, la température et la fréquence de l'onde.

De plus, dans le cas de contrôle *in situ*, la longueur parcourue dans le béton peut être inaccessible et l'influence de la géométrie de la structure sur le trajet des ondes reste parfois difficile à maîtriser.

Pour travailler dans ce contexte, le contrôle doit s'appuyer sur les phénomènes de propagation des ondes ultrasonores mais aussi sur l'analyse de la diffusion et de la dispersion de ces ondes.

La présence de granulats, de fissures ou la création de liens intergranulaires ou/et de microfissures modifient les conditions de diffusion des ondes en fonction de leurs tailles, de leur nombre ou densité mais aussi de la longueur d'onde exploitée. Les paramètres d'ondes qui évoluent sont l'énergie et le spectre fréquentiel de l'onde ultrasonore.

Nous présentons ici notre travail sur la mise en évidence de ces indicateurs et sur leur suivi dans le cas de la prise de bétons, de l'endommagement par alcali-réaction et de l'endommagement thermique. Dans le premier cas, la formation de liens intergranulaires assure plus aisément le transfert de l'énergie de l'onde, alors que dans le cas des endommagements, l'apparition de fissures conduit clairement à une réduction de ce transfert.

Pour chacune de ces études, un indicateur ultrasonore est étudié et le lien entre celui-ci et l'évolution de la microstructure est analysé. Le béton apparaît alors comme un filtre fréquentiel évolutif.

L'approche *in situ* est orientée vers la prise d'informations caractéristiques sans avoir besoin de connaître avec précision la distance parcourue par l'onde ultrasonore. Les méthodes d'analyses consistent en une étude temps-fréquence d'une onde transmise ou réfléchi et une exploitation des ondes rétrodiffusées. Les ondes rétrodiffusées font l'objet d'une étude théorique afin de préciser leurs gammes d'utilisation et des premiers résultats montrent leur sensibilité à l'évolution de la micro-structure.

Mesure du temps de prise

Dans le cadre de la réalisation d'un barrage, la maîtrise du délai de maniabilité permet d'assurer une liaison par pontages chimiques entre les grains de deux couches déposées successivement. La mesure de ce temps de prise dans le cas de liant à cinétique rapide ne peut être effectuée par un simple suivi de la vitesse des ondes ultrasonores. Nous la réalisons sur la base du suivi de son spectre en fonction du temps de prise. Les ondes sont transmises à travers des éprouvettes cylindriques (\varnothing 160 mm*160 mm). Les transducteurs (\varnothing 50 mm) sont de fréquence centrale 24 kHz.

La répartition de l'amplitude de l'onde avec la fréquence est donnée en exemple pour le signal obtenu à 70 h sur la figure 1B. Une image de l'évolution de la densité spectrale de puissance est donnée en fonction de l'âge du béton sur la figure 1A. Elle montre, dans les premiers temps de prise, que l'énergie de l'onde transite difficilement dans les hautes fréquences alors que lorsque le temps augmente, les grains sont connectés et l'énergie transmise augmente d'une façon conséquente. Les hautes fréquences ne sont plus filtrées.

Une modélisation du comportement acoustique du béton au cours de la prise a permis de mettre en évidence l'importance des pontages intergranulaires dans les phénomènes de solidification [1]. Des analyses microstructurales et des essais mécaniques ont conduit à définir le temps de prise à partir d'une singularité systématique de l'évolution du maximum d'amplitude du spectre fréquentiel de l'onde ultrasonore au cours du temps (fig. 2). L'énergie ultrasonore transmise augmente avec le temps et ainsi avec le taux de pontage. Le délai de maniabilité correspond temporellement au début de la formation massive de silicates de calcium hydratés appelés CSH. Ces hydrates forment dans le cas des deux liants testés le constituant principal du béton réalisé.

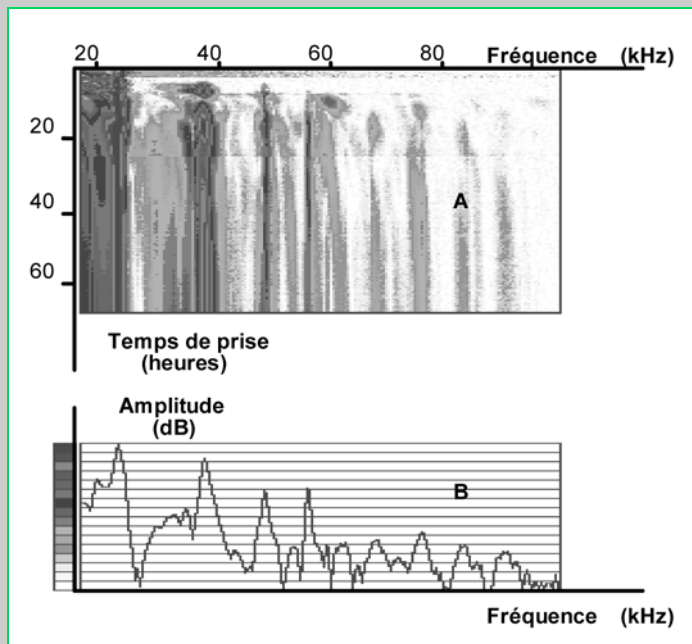


Fig. 1 - Évolution de la densité spectrale de puissance du signal ultrasonore en fonction de l'âge du béton.

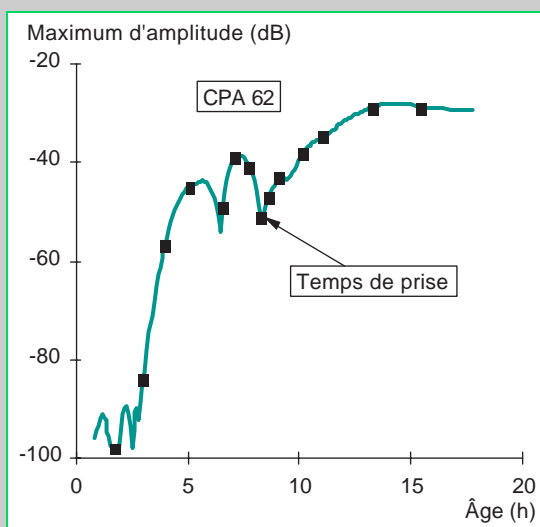


Fig. 2 - Évolution du maximum d'amplitude du signal ultrasonore en fonction de l'âge du béton.

Des essais ont montré la répétabilité et la sensibilité de cette analyse sur deux liants. L'un de type CPA a une cinétique de prise rapide, l'autre de type LRCC a une cinétique de prise lente.

L'application *in situ* de cette technique doit permettre de s'affranchir de la mesure de vitesse et donc de la distance dans le cas d'accessibilité limitée. Il est envisageable de travailler suivant ce principe sur une onde de réflexion, mais sans connaître avec précision la distance ou encore à partir d'ondes de surface.

Suivi de l'endommagement par alcali-réaction

L'endommagement par alcali-réaction génère des gels expansifs qui se développent dans les fissures et porosités initiales du béton. Les contraintes internes augmentent et provoquent une fissuration. Un nouveau cycle de génération de gels peut démarrer et de nouvelles fissures peuvent apparaître. Nous avons généré ce type d'endommagement sur des éprouvettes confinées (température 60 °C et humidité 100 %). Nous avons comparé au cours du temps les dilatations des échantillons sains et endommagés ainsi que les évolutions des ondes ultrasonores transmises à travers des éprouvettes

cylindriques (\varnothing 160 mm*160 mm) [2]. Les transducteurs utilisés sont les mêmes que pour l'étude du temps de prise. Les points 1 à 4 des figures 3 à 7 correspondent aux dates 0, 10, 30 et 80 jours.

L'échantillon endommagé montre une expansion importante. L'écart de vitesses des ondes ultrasonores indique la sensibilité de ce paramètre. Dans le cas de l'échantillon endommagé, ces variations sont liées aux changements de la microstructure.

Dans un premier temps (de 1 à 2) la vitesse augmente avec la prise du béton, puis chute (de 2 à 3) lors de la croissance des fissures et enfin croît de nouveau (de 3 à 4) lorsque le gel remplit de nouveau les fissures existantes. Les fissures apparaissent comme des diffuseurs qui viennent s'ajouter à ceux existants (granulats et sable). Elles favorisent la diffusion des ondes et augmentent le parcours moyen de celles-ci à travers l'échantillon.

Toutefois dans le cas d'un travail *in situ*, il est parfois difficile de connaître précisément l'épaisseur de la paroi traversée par l'onde ultrasonore. Dans ce cas, il est nécessaire de travailler sur un indicateur qui est intrinsèque au signal lui-même.

La figure 5 permet de comparer l'amplitude des transformées de Fourier des ondes transmises dans un béton endommagé pour les âges 2 et 3. Les fissures qui sont créées entre ces deux instants filtrent d'une façon importante les hautes fréquences. La figure 6 présente le rapport R ampl. des amplitudes des fréquences 53 kHz et 24 kHz pour les signaux recueillis aux différents âges. Les écarts entre les éprouvettes saines et endommagées caractérisent le transfert d'énergie des hautes vers les basses fréquences.

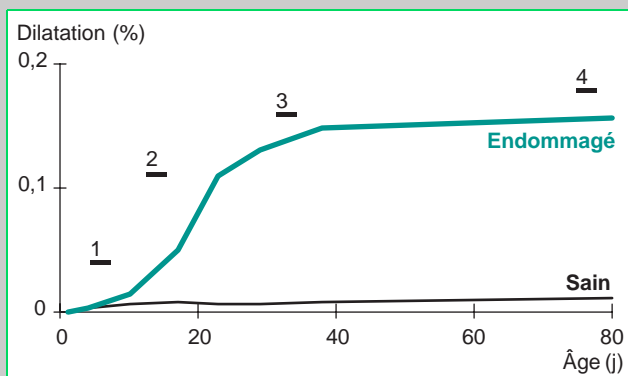


Fig. 3 - Évolution de la dilatation des éprouvettes avec l'âge du béton.

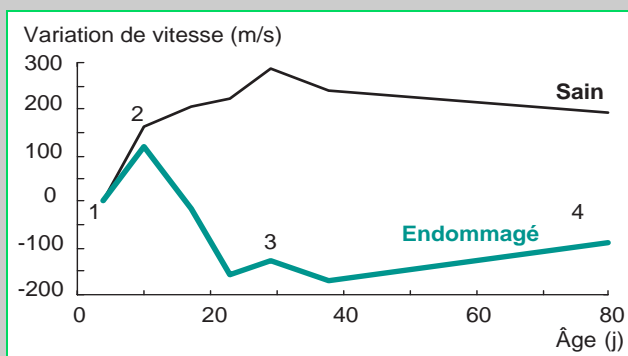


Fig. 4 - Évolution de la vitesse des ondes ultrasonores avec l'âge du béton.

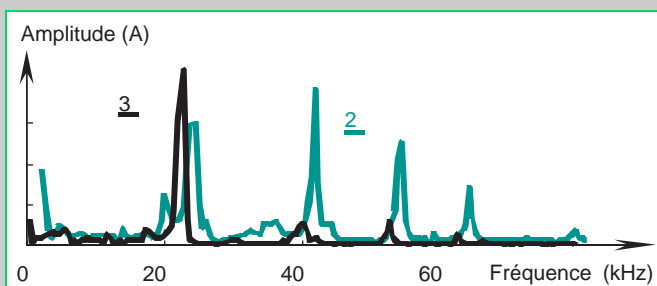


Fig. 5 - Spectre fréquentiel (FFT) pour les signaux transmis dans l'échantillon endommagé aux dates 10 jours (2) et 30 jours (3).

Une représentation plus pertinente de ce comportement est donnée par un traitement par ondelette. Ces images temps-fréquence permettent de visualiser la répartition de l'énergie de l'onde tant sur l'aspect fréquentiel que sur l'aspect temporel du signal ultrasonore. La figure 7 donne ces images pour les dates 0, 10, 30 et 80 jours. À chaque instant du signal ultrasonore, il est possible de connaître la distribution fréquentielle de l'énergie par une échelle de couleur (bleu à rouge). Une transmission aisée d'une fréquence déterminée de l'onde sera caractérisée par une couleur tendant vers le rouge. L'énergie globale transférée par cette fréquence augmentera avec une présence temporelle sur l'image qui augmentera.

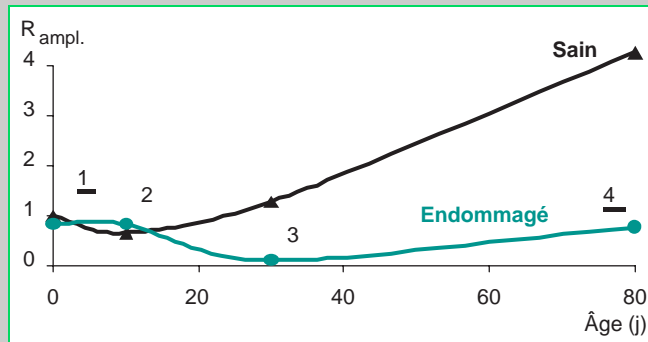


Fig. 6 - Évolution du rapport d'amplitude $R_{ampl.}$ des fréquences 53 kHz et 24 kHz.

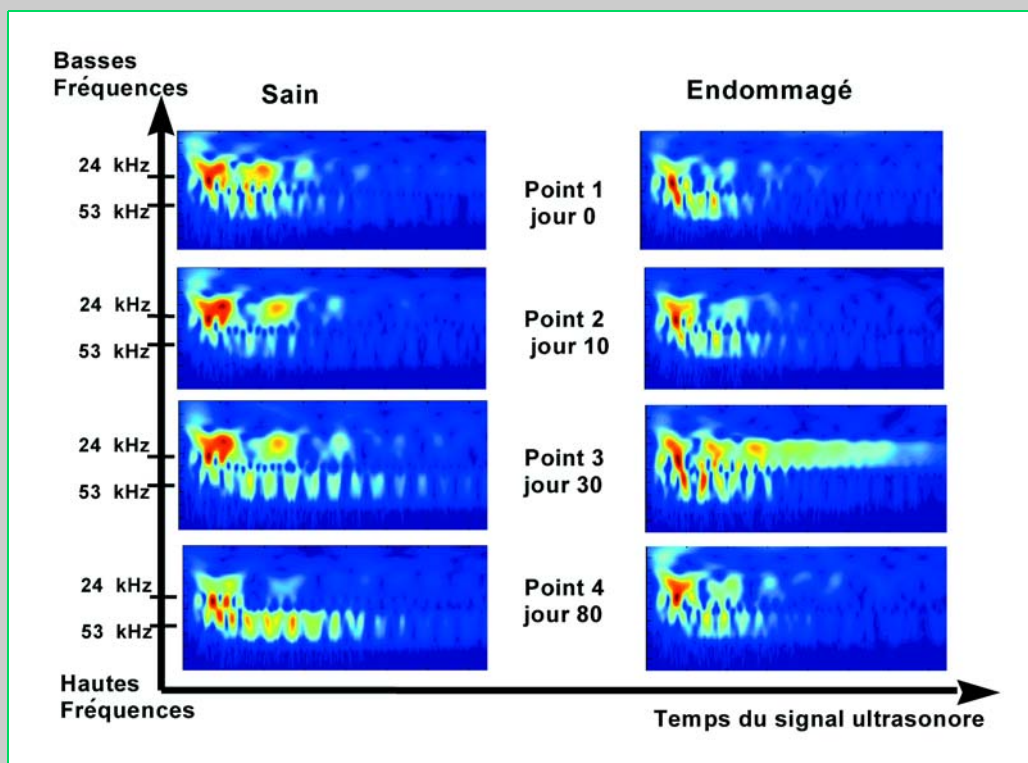


Fig. 7 - Image temps-fréquence des signaux ultrasonores transmis à travers les échantillons sains et endommagés pour les dates 0, 10, 30 et 80 jours.

Dans le cas de l'échantillon sain au cours du temps, le transfert d'énergie depuis les basses fréquences (24 kHz) vers les plus hautes fréquences (53 kHz) est continu. Il correspond au vieillissement naturel du béton. Les liants intergranulaires se multiplient et les ondes de hautes fréquences transisent d'autant mieux et plus rapidement que le béton mûri. À la date de 80 jours, la plus grande partie de l'énergie transite sous la forme de hautes fréquences.

Dans le cas de l'échantillon endommagé au cours du temps, le transfert d'énergie depuis les basses fréquences vers les hautes fréquences est perturbé par l'apparition des fissures. À la date de 30 jours,

les basses fréquences sont prépondérantes tant en énergie qu'en durée. Les hautes fréquences sont donc largement diffusées par les fissures et l'énergie transmise correspondante est faible.

L'application *in situ* de l'analyse fréquentielle et surtout de l'image temps-fréquence permet de connaître la répartition temporelle et fréquentielle de l'énergie d'une onde ultrasonore. L'exploitation du transfert depuis les basses fréquences vers les hautes fréquences reste une information relative et intrinsèque au signal lui-même. Il devient alors envisageable d'exploiter ce paramètre sur des signaux transmis ou réfléchis pour lesquels la distance parcourue peut rester approximative ou encore sur des ondes de surfaces voire rétrodiffusées.

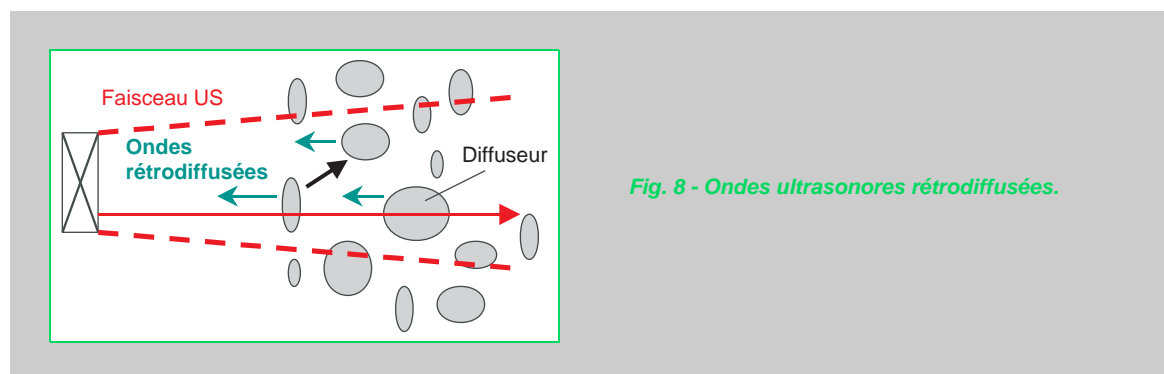
Caractérisation de l'endommagement thermique par ondes rétrodiffusées

Introduction

Le béton qui est soumis à des cycles ou à des maintiens en température peut subir des altérations importantes. Nous étudions un matériau soumis à un gradient de température qui peut atteindre 200 °C sur des distances de l'ordre du mètre. Ce type d'endommagement conduit à une fissuration plus ou moins importante en fonction de la température atteinte. Nous travaillons à partir de plusieurs échantillons soumis chacun à une température fixe durant 30 jours. Afin d'envisager le problème *in situ* (accès à une seule face), nous avons développé une méthode d'exploitation des ondes rétrodiffusées dans le béton.

Lors de l'auscultation ultrasonore, en mode échographique, de structures hétérogènes, il est souvent observé sur les signaux obtenus un bruit de structure. Celui-ci a, pendant des années, fait l'objet d'études [3, 4] en vue de son élimination pour pouvoir faire apparaître de manière claire des informations telles qu'un écho d'interface ou un écho sur un défaut. Cependant, ce bruit résulte de l'interaction entre l'onde incidente et les obstacles rencontrés. Il est donc porteur d'informations sur le milieu d'étude et notamment sur les éléments capables d'interagir avec l'onde que sont les diffuseurs. Le béton, de par son hétérogénéité de composition, est en mesure de générer, sous des conditions adaptées de fréquence par rapport à la taille des diffuseurs, des ondes rétrodiffusées (fig. 8).

Les matériaux métalliques à gros grains, tels que les aciers austénitiques sur lesquels l'auscultation ultrasonore a été particulièrement développée, ont permis les premières analyses [5, 6] de signaux rétrodiffusés et les premiers développements de modèles relatifs à ces ondes. Un modèle, construit pour les matériaux polycristallins, fait l'objet de cette étude. Après la présentation du modèle et de son inversion permettant d'estimer le coefficient d'atténuation, nous présentons une adaptation au cas du béton. La simulation permet de cerner le choix des fréquences de travail. L'étude expérimentale permet d'observer et d'exploiter les ondes rétrodiffusées sur différentes compositions de bétons endommagés ou non. Les conclusions et perspectives d'étude sont établies en dernière partie.



Modèle de signal rétrodiffusé

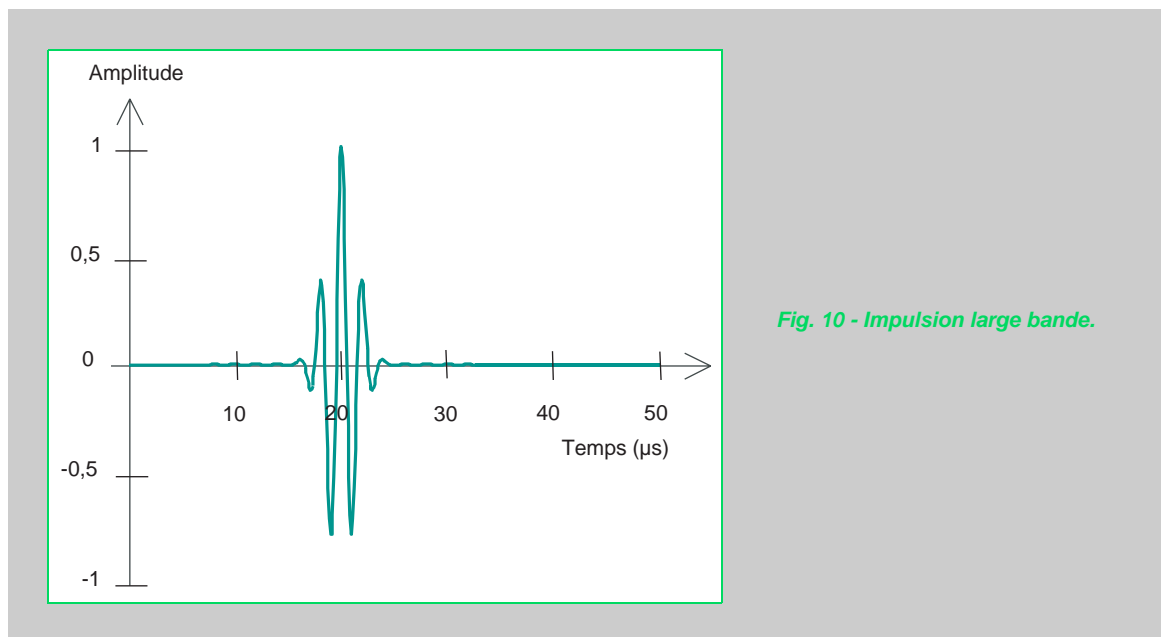
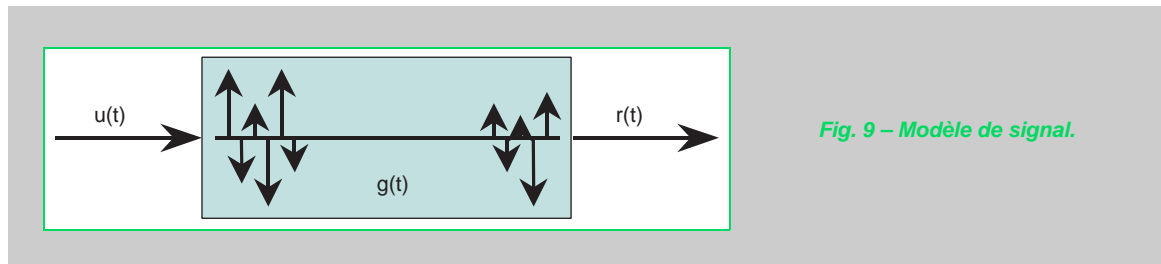
Le modèle [7] propose de décrire le signal rétrodiffusé (fig. 9) comme la convolution de la réponse impulsionnelle du transducteur $u(t)$ par celle du milieu inspecté $g(t)$:

$$r(t) = u(t) * g(t) \quad (1)$$

La modélisation du signal ultrasonore se fait par une impulsion large bande (fig. 10) dont l'enveloppe est de forme gaussienne :

$$u(t) = e^{-\gamma \cdot t^2} \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \quad (2)$$

où ω est la pulsation centrale de l'impulsion et γ est l'inverse du carré de la largeur temporelle de l'impulsion.



Le milieu est considéré comme élastique linéaire isotrope et hétérogène ; les effets dissipatifs ne sont pas pris en compte ; l'atténuation (α_d) des ondes dans le milieu est donc uniquement liée à la diffusion sur les hétérogénéités. Le milieu hétérogène est modélisé par un nombre fini (M) d'obstacles, appelés aussi diffuseurs, caractérisés par une section de diffusion (σ_{sk}) et une position temporelle (τ_k) sur l'axe du faisceau ultrasonore. La réponse impulsionnelle du milieu est ainsi définie :

$$g(t) = \sum_{k=1}^M \sigma_{sk} \cdot e^{-\alpha_d \cdot C_p \cdot \tau_k} \cdot \delta(t - \tau_k) \quad (3)$$

où $\delta(t - \tau_k)$ introduit le décalage temporel lié au diffuseur présent en τ_k , $e^{-\alpha_d \cdot C_p \cdot \tau_k}$ permet la prise en compte de l'atténuation dans le milieu par rapport à la position spatiale du diffuseur ($C_p \cdot \tau_k$) et au coefficient d'atténuation par diffusion (α_d). C_p est la vitesse de phase des ondes dans le milieu homogène équivalent. La fonction $g(t)$ ainsi construite ne prend pas en compte les interactions entre les diffuseurs ; une approximation de diffusion simple est donc appliquée.

En utilisant (1), (2) et (3) il vient que :

$$r(t) = \sum_{k=1}^M \sigma_{sk} \cdot e^{-\alpha_d C_p \cdot \tau_k} \cdot e^{i \cdot \omega \cdot (t - \tau_k)} \cdot e^{-\gamma \cdot (t - \tau_k)^2} \quad (4)$$

Seules les variables temporelles t et τ_k ainsi que M ne dépendent pas de la fréquence.

Inversion du problème : estimation du coefficient d'atténuation

Dans la région du champ lointain, on a $(t - \tau_k = \varepsilon) \ll t$ et $e^{-\alpha_d \cdot \tau_k} \approx e^{-\alpha_d \cdot t}$; l'écriture du signal rétrodiffusé se simplifie en :

$$r(t) = e^{-\alpha_d \cdot C_p \cdot t} \cdot \sum_{k=1}^M \sigma_{sk} \cdot e^{i \cdot \phi_k} \quad (5)$$

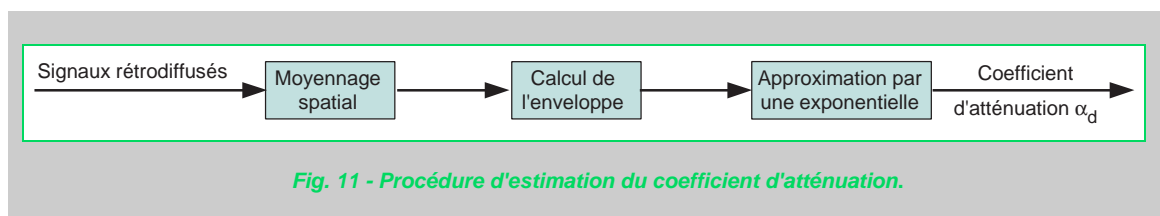
où $\phi_k = (t - \tau_k) \cdot \omega$ est la phase dépendant de la position temporelle de l'obstacle k .

Les tailles et positions temporelles des diffuseurs sont des variables aléatoires comprises dans des plages de valeurs. Il ressort que σ_{sk} et ϕ_k sont aléatoires ; $(\sigma_{sk} \cdot e^{i \cdot \phi_k})$ est alors appelé phaseur aléatoire. Tout signal décrit par une somme de phaseurs aléatoires [8] a une enveloppe qui suit une densité de probabilité de Rayleigh. L'application de cette densité de probabilité au modèle donne pour valeur de l'enveloppe :

$$E[r(t)] = \frac{\sqrt{M \cdot \sigma_s^2 \cdot \pi}}{2} \cdot e^{-\alpha_d \cdot C_p \cdot t} \quad (6)$$

où σ_s est la moyenne des sections de diffusion σ_{sk} dans le milieu.

L'aspect aléatoire de certaines variables et la taille des diffuseurs par rapport à la taille du faisceau impliquent de travailler sur des signaux moyens ; ainsi le coefficient d'atténuation par diffusion du milieu peut être obtenu par approximation de l'enveloppe de signaux rétrodiffusés par une exponentielle décroissante (fig. 11).



Extension du modèle à l'auscultation du béton endommagé

Le béton est un matériau hétérogène composé d'une matrice de ciment et d'inclusions de roche. L'endommagement de celui-ci se traduit généralement par l'apparition puis l'évolution de microfissures. Nous sommes donc en présence de deux types de diffuseurs différents que nous introduisons dans le modèle par :

$$g(t) = \sum_{j=1}^{Mg} \sigma_{sj} \cdot e^{-\alpha_d \cdot C_p \cdot \tau_j} \cdot \delta(t - \tau_j) + \sum_{k=1}^{Mm} \sigma_{sk} \cdot e^{-\alpha_d \cdot C_p \cdot \tau_k} \cdot \delta(t - \tau_k) \quad (7)$$

où la première somme correspond aux diffuseurs liés à la composition et la seconde aux diffuseurs liés à l'endommagement. τ_j et τ_k sont des variables aléatoires.

Simulation

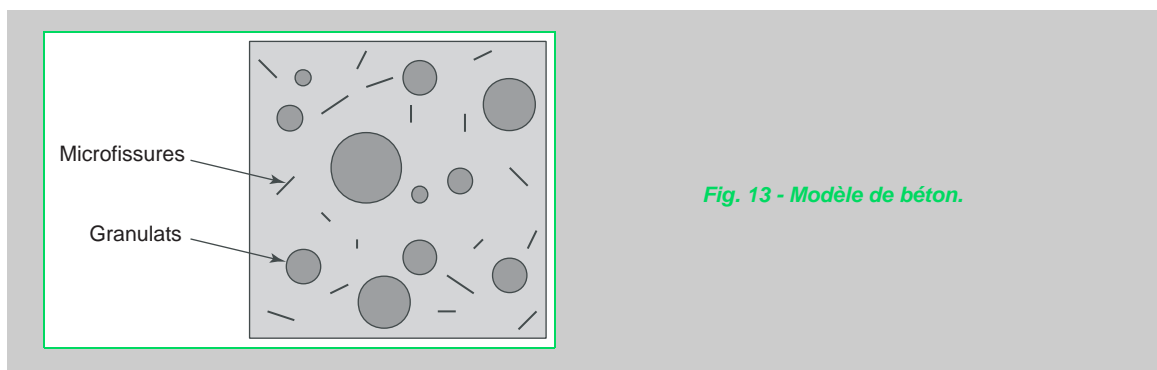
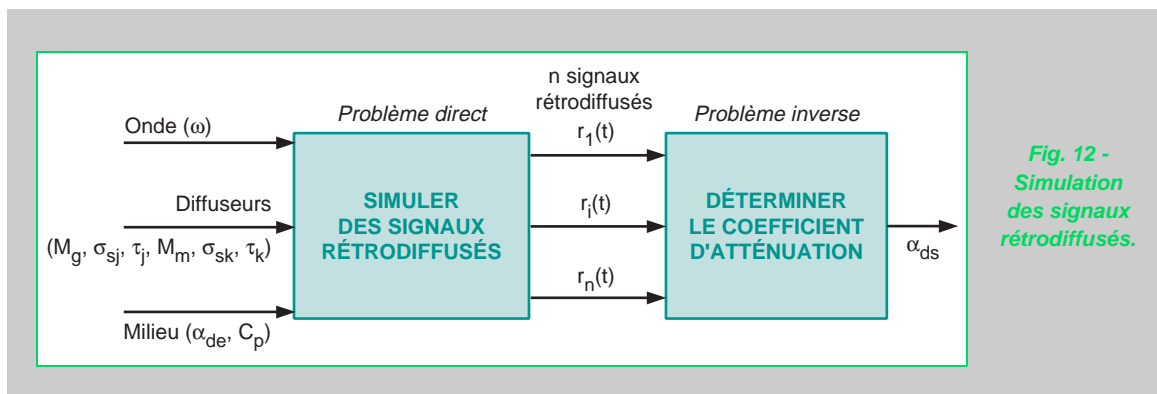
Principe

Cette simulation a pour objectif d'évaluer les potentialités du modèle à caractériser le milieu. Nous avons évalué la gamme de fréquences de travail en comparant le coefficient d'atténuation entré (α_{de}) pour la construction des signaux rétrodiffusés à celui obtenu (α_{ds}) après application des problèmes direct et inverse (fig. 12).

L'estimation de la profondeur d'exploration a été réalisée par l'étude de la durée des signaux rétrodiffusés moyens (sur 32 signaux ($r_i(t)$)).

La plage de fréquences auscultées s'étend de 25 kHz à 2,5 MHz et correspond à des valeurs de fréquences classiquement utilisées dans le béton. Les valeurs du coefficient d'atténuation α_d (de 10 à 100 NP/m) sont issues de la littérature [9] et dépendent de la fréquence ainsi que de l'état d'endommagement du milieu. Pour l'étude des domaines de validité du modèle, la vitesse de phase C_p est un paramètre identique en entrée et en sortie. Elle est prise indépendante de la fréquence et varie de 3 600 à 4 400 m/s en fonction de l'endommagement du milieu [10].

La fabrication assure une forme de granulat peu allongée, ce qui nous permet de modéliser les granulats par des sphères (fig. 13). L'endommagement qui apparaît sous forme de microfissures est pris en compte dans le modèle par des disques. Nous travaillons dans cette étude uniquement sur des valeurs relatives en amplitude, un calcul approché [11] des sections de diffusion σ_{sj} pour les sphères et σ_{sk} pour les disques a été retenu.



Différentes compositions classiques de bétons (mortier, micro-béton, béton) ont été simulées. Divers états d'endommagement par microfissuration sont ensuite introduits. Un exemple de signal est fourni sur la figure 14.

Résultats

L'erreur obtenue entre le coefficient d'atténuation entré dans la simulation et celui issu de la simulation a été calculée par :

$$\text{Err}[\alpha_d] = \left| \frac{\alpha_{ds} - \alpha_{de}}{\alpha_{de}} \right| \cdot 100 \quad (8)$$

Les résultats obtenus sont équivalents quelle que soit la composition testée et quel que soit le niveau d'endommagement simulé, ils sont présentés sur la courbe de la figure 15. Il ressort que l'erreur induite sur l'obtention du coefficient d'atténuation augmente quand la fréquence de l'onde baisse. Cette augmentation s'explique par le fait qu'à basse fréquence la diffusion des ondes est moins importante. Les informations contenues dans les signaux rétrodiffusés sont donc de plus faibles amplitudes. En fixant une erreur maximale de 5 % pour nos milieux d'étude, la limite inférieure du domaine d'auscultation est de 500 kHz.

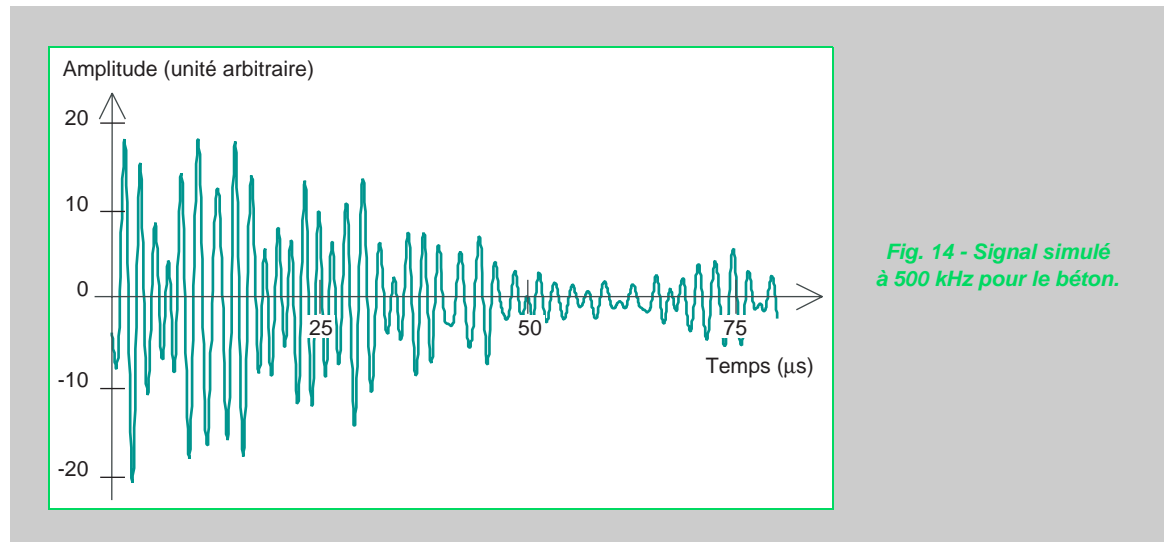


Fig. 14 - Signal simulé à 500 kHz pour le béton.

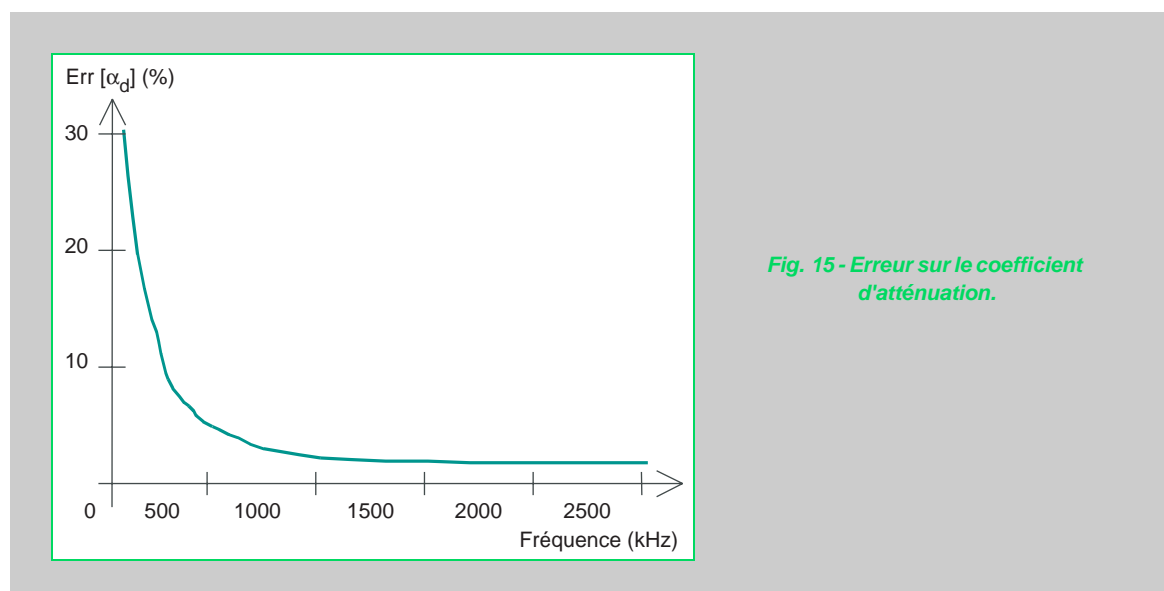


Fig. 15 - Erreur sur le coefficient d'atténuation.

La profondeur d'exploration, obtenue par observation de la durée des signaux rétrodiffusés, est donnée sur la figure 16. Cette profondeur décroît avec l'augmentation de la fréquence. Elle est liée à l'atténuation des ondes dans le milieu. La plage de fréquences s'étend de 500 kHz à 2,5 MHz avec des profondeurs d'exploration respectivement comprises entre 140 et 35 mm.

Étude expérimentale

Les essais ont été réalisés en immersion en mode émission-réception sur le même transducteur. La chaîne d'acquisition est donnée sur la figure 17. Les trois transducteurs utilisés ont des spectres larges bandes centrés respectivement sur 500 kHz, 1 MHz et 2,25 MHz. Les éprouvettes auscultées sont de formes cylindriques ($\varnothing 160 \times 160$ ou $\varnothing 110 \times 220$).

Chaque signal expérimental est la superposition d'échos à différentes positions temporelles correspondant à la rétrodiffusion de l'onde sur un diffuseur particulier (fig. 18). L'amplitude de ces échos

dépend de la position de ceux-ci mais aussi de la fréquence de l'onde. La décroissance prévue par le modèle peut être observée sur les signaux. Elle ne devient significative qu'après moyennage. Les résultats sont obtenus à partir de moyennes sur seize signaux rétrodiffusés.

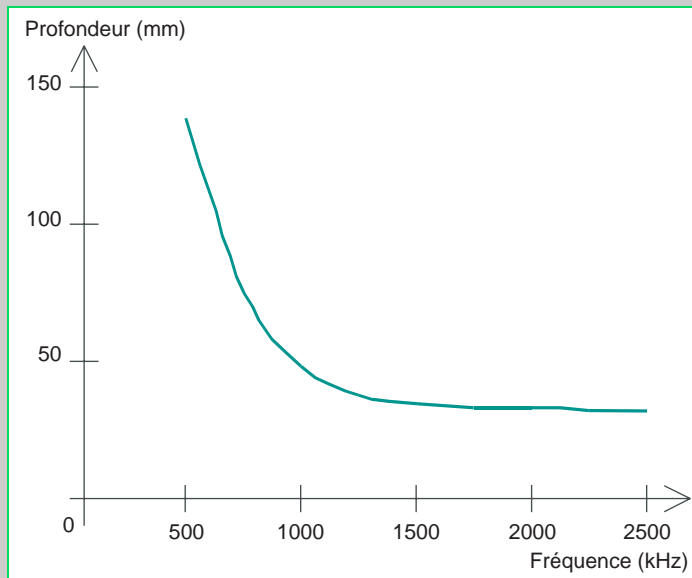


Fig. 16 - Profondeur d'exploration.

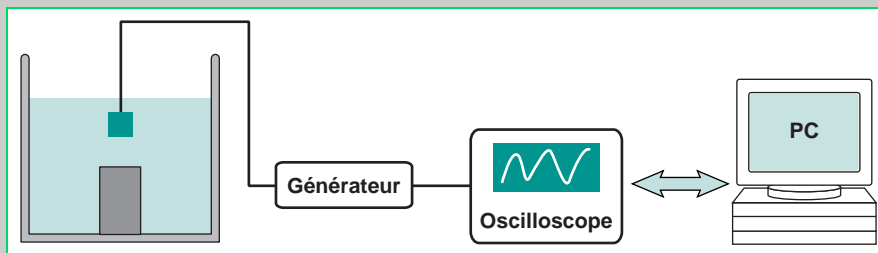


Fig. 17 - Chaîne d'acquisition.

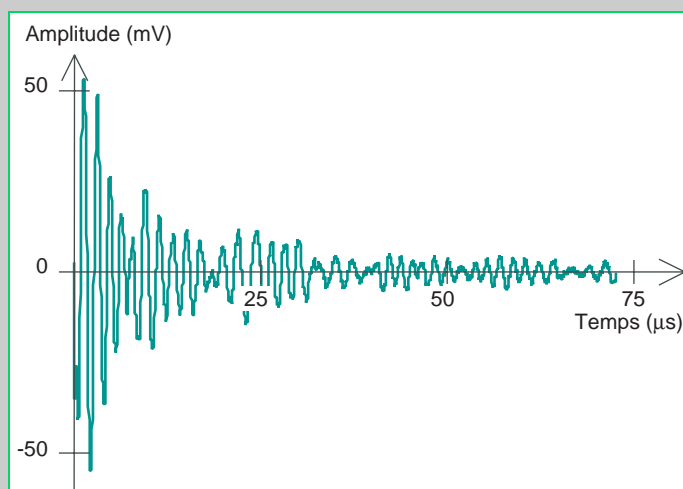


Fig. 18 - Signal expérimental à 500 kHz dans du béton.

Différentes formulations (tableau I) ont permis de tester la sensibilité des ondes rétrodiffusées face à des variations de composition. Il en ressort une légère chute du coefficient d'atténuation avec l'augmentation de la taille des granulats quelle que soit la fréquence (fig. 19). Cette chute peut s'expliquer

par le fait que le taux volumique de granulat est resté constant dans les trois compositions. Il en découle que plus les granulats sont de tailles importantes moins leur nombre est grand sur le parcours de l'onde et moins la rétrodiffusion est importante.

TABLEAU I

Différentes compositions (en % volumiques)

	Mortier	Micro-béton	Béton
Ciment	34	34	34
Sable 0/5	66	33	33
Granulats 6,3/12,5	/	33	/
Granulats 12,5/20	/	/	33

L'endommagement par microfissuration a été étudié sur des spécimens d'une même formulation soumis à différents niveaux de sollicitations thermiques. Des mesures de modules d'élasticité ont confirmé la présence de cet endommagement (tableau II). Des observations microscopiques ont confirmé la présence d'une densité croissante de microfissures avec la température d'essai. La figure 20 montre que le coefficient d'atténuation mesuré par les signaux rétrodiffusés croît avec les sollicitations thermiques imposées et donc avec le taux de fissuration. Les diffuseurs devenant plus nombreux, ce coefficient augmente. Il peut servir d'indicateur de l'état d'endommagement du béton.

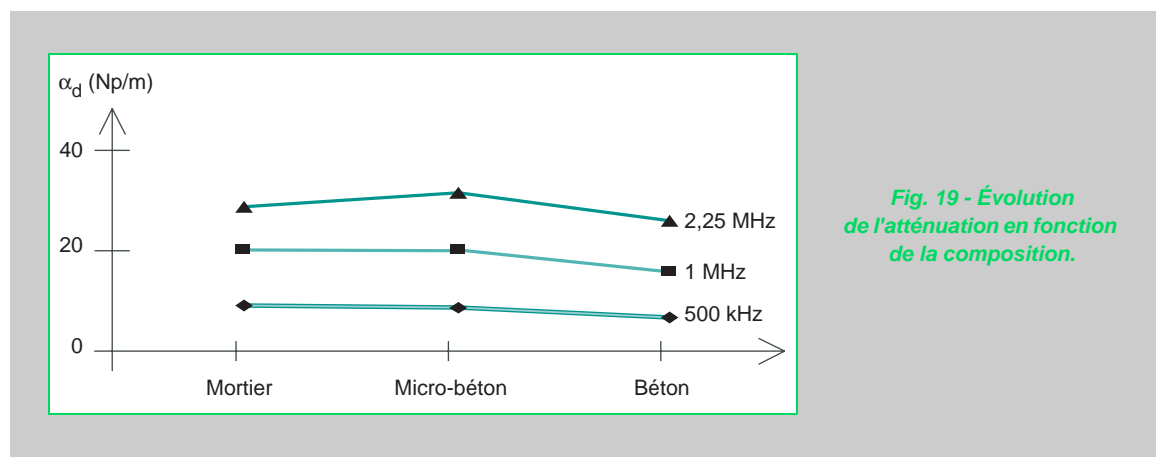


Fig. 19 - Évolution de l'atténuation en fonction de la composition.

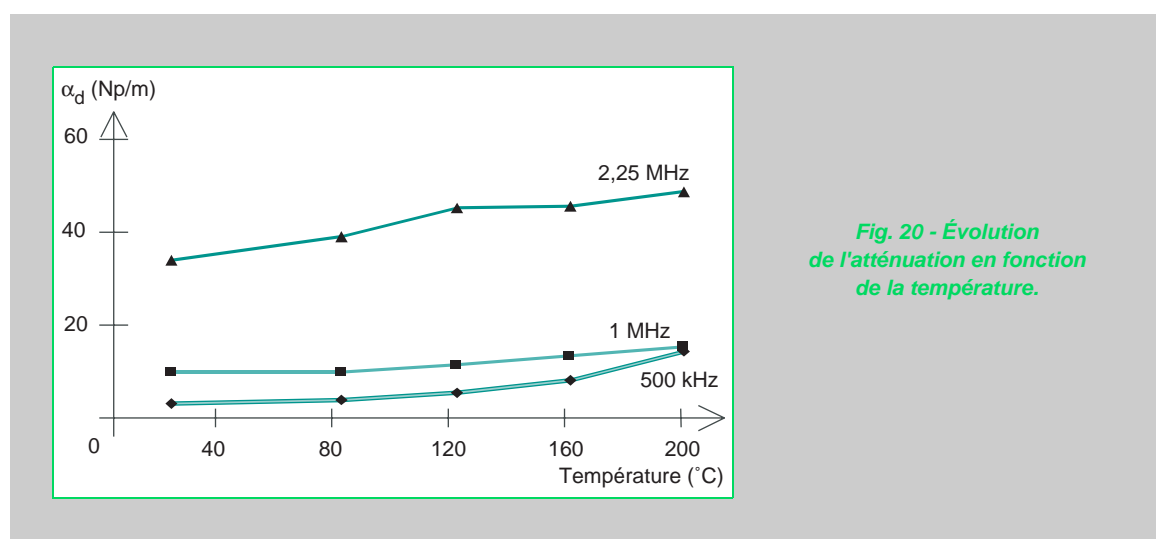


Fig. 20 - Évolution de l'atténuation en fonction de la température.

TABLEAU II
Différents états d'endommagement

Sollicitation thermique (°C)	20	80	120	160	200
Module d'élasticité (MPa)	56	43	38	31	26

Synthèse

Cette étude sur les ondes rétrodiffusées obtenues sur des structures en béton a permis d'analyser la sensibilité du coefficient d'atténuation déduit des ondes rétrodiffusées. L'influence de la composition est faible, mais celle de l'état d'endommagement par microfissuration est par contre importante. Cet indicateur ultrasonore pourrait répondre au problème de la caractérisation non destructive *in situ* du béton. Pour y parvenir, il est nécessaire d'affiner ces résultats par des mesures de vitesse et d'atténuation en fonction de la fréquence par transmission d'ondes ultrasonores. La modélisation sera optimisée en introduisant les équations de diffusion multiple et l'évolution du spectre fréquentiel au cours de la propagation de l'onde.

Conclusion

La caractérisation de l'état d'endommagement d'une structure en béton *in situ* est souvent délicate en raison de l'épaisseur importante de matière ou de difficultés d'accès aux faces de la structure.

Nous avons travaillé pour **trois cas** d'évolution du béton sur des indicateurs ultrasonores permettant d'envisager un travail *in situ* à partir d'ondes de surface ou d'ondes réfléchies sur un élément non positionné avec précision.

- Une **première voie** est de suivre dans le temps et relativement à elles-mêmes des informations du signal ultrasonore (énergie, amplitude ou spectre fréquentiel).
- Une **deuxième voie** est d'analyser les paramètres intrinsèques au signal lui-même tel que les transferts d'énergie tant sur l'aspect fréquentiel que sur l'aspect temporel d'un signal ultrasonore.
- Nous avons proposé aussi d'exploiter les ondes rétrodiffusées. C'est une **troisième voie** qui permet de s'affranchir totalement de réflecteur. Les champs de fréquence et de profondeur exploitables sont quantifiables à partir d'une modélisation. Les résultats sont à ce jour exploitables en terme de comparaison.

Pour ces trois voies, les travaux en cours consistent à modéliser la propagation des ondes ultrasonores dans le béton en s'appuyant sur les principes de la diffusion multiple dans les milieux hétérogènes. Les résultats permettront de mieux maîtriser les phénomènes de diffusion et de cohérence des ondes ultrasonores se propageant. Les outils que nous avons proposés pourront s'appliquer et servir de base pour l'inversion du problème *in situ*.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] GARNIER V., CORNELOUP G., SPRAUEL J.-M., PERFUMO J.-C., Setting time of roller compacted concrete by spectral analysis of transmitted ultrasonic signals, *NDT International*, vol. 28, **1**, **1995**, pp. 15-22.
- [2] GARNIER V., CORNELOUP G., *Étude de faisabilité sur la recherche d'indicateurs ultrasonores adaptés au suivi du phénomène d'alcali-réaction dans les bétons*, Contrat IUT-EDF, **1996**.
- [3] KARAOGUZ M., BILGÜTAY N., AKGÜL T., POPOVICS S., Ultrasonic testing of concrete using Split Spectrum Processing, *Materials Evaluation*, **1999**, pp. 1183-1190.
- [4] TOURIN A., DERODE A., FINK M., Dynamic Time Reversal of randomly backscattered acoustic waves, *Europhysics Letters*, vol. 47, **2**, **1999**, pp. 175-181.
- [5] BORDIER J.-M., FINK M., LE BRUN A., COHEN-TENOUDJI F., Influence de la diffusion multiple dans le contrôle ultrasonore des aciers austénitiques à gros grains, Colloque C1, *supplément au Journal de Physique III*, vol. 2, **1992**, pp. 839-843.
- [6] ROSE J.L., KARPUR P., NEWHOUSE V.L., Utility of split-spectrum processing in ultrasonic nondestructive evaluation, *Materials Evaluation*, **46**, **1988**, pp. 114-122.

- [7] SANIIE J., WANG T., BILGUTAY N.M., Statistical evaluation of backscattered ultrasonic grain signals, *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 84, **1**, **1988**, pp. 400-408.
- [8] COULON F., *Théorie et traitement des signaux*, Dunod, **1984**, 548 pages.
- [9] LANDIS E.N., SHAH S.P., Frequency-dependent stress wave attenuation in cement-based materials, *Journal of engineering mechanics*, vol. 121, **6**, **1995**, pp. 737-743
- [10] SELLECK S.F., LANDIS E., PETERSON M.L., SHAH S.P., ACHENBACH J.D., Ultrasonic investigation of concrete with distributed damage, *ACI Materials Journal*, vol. 95, **1**, **1998**, pp. 27-36.
- [11] BOWMAN J.J., SENIOR T.B.A., USLENGHI P.L.E., *Electromagnetic and acoustic scattering by simple shapes*, North Holland Publishing Company, Amsterdam, **1969**.