

Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

DIFFUSION DES ONDES ULTRASONORES APPLIQUÉE À LA CARACTÉRISATION D'ENDOMMAGEMENT DE BÉTON

USE OF DIFFUSION ANALYSIS OF ULTRASONIC WAVES TO CHARACTERIZE THE DAMAGE OF CONCRETE

JF. CHAIX(*), C. PAYAN, V. GARNIER, A. QUIVIGER

LMA CNRS UPR7051, Université d'Aix-Marseille, LCND, Av. Gaston Berger 13625 Aix-en-Provence Cedex

* auteur correspondant : jean-francois.chaix@univ-amu.fr

RÉSUMÉ

L'endommagement des bétons se présente, pour un grand nombre de pathologies, sous forme de modifications microstructurales liées à l'apparition et l'évolution en nombre et taille de microfissures. Dans un stade plus avancé, des macrofissures se développent et progressent jusqu'à la ruine de la structure. Afin de prévenir ce dernier stade, il est important en CND de détecter en amont et le plus tôt possible les premiers signes d'endommagement. En présence d'obstacles dans le milieu de propagation, les ondes ultrasonores sont diffusées et les signaux obtenus s'allongent et se composent alors d'une superposition d'ondes. Pour de forts niveaux de diffusion l'onde cohérente n'est alors plus observée et les théories de diffusion permettent de décrire l'évolution de l'énergie dans le milieu. Par une approximation 2D, il est possible de déterminer les paramètres de diffusion D , de dissipation s et le temps d'arrivée du maximum de l'énergie ATME qui sont caractéristiques de l'évolution de l'énergie. Le béton est le siège d'une multidiffusion importante liée à la formulation mais également liée à l'endommagement. Les variations relatives des observables de diffusion (D , Σ et ATME) permettent de caractériser l'évolution d'un endommagement dans le matériau. Nous montrons par une étude expérimentale les évolutions de ces paramètres sur des

échantillons de même composition à divers stades d'endommagement. Le potentiel de ces techniques comme solutions de caractérisation non destructive est encourageant et les perspectives associées sont identifiées.

ABSTRACT

Damage to concrete arises, for a wide range of pathologies, as microstructural changes associated with the onset and progression in number and size of microcracks. In a more advanced stage, macrocracks are developing and progressing to the collapse of the structure. To prevent this last point, it is important for CND to detect upstream and as soon as possible early signs of damage. In the presence of obstacles in the propagation medium, the ultrasonic waves are scattered and the obtained signals are extended and then consist of a superposition of waves. For high levels of scattering, coherent wave is then no longer observed and the diffusion theories used to describe the evolution of the energy in the medium. By a 2D approximation, it is possible to determine the diffusivity parameter D , dissipation s and the Arrival Time of the Maximum Energy ATME that are characteristic of the energy evolution. Concrete is the seat of an important multiple scattering related to the formulation but also related to damage. Relative variations of

the observable in energy diffusion (D , s and $ATME$) allow to characterize the evolution of damage in the material. We show an experimental study of these parameters evolution on samples with the same composition at various stages of damage. The potential of these techniques as solutions of Non-Destructive Testing is encouraging and prospects associated are identified.

Mots-clés : Ultrasons diffus, Caractérisation Non Destructive, Coda, Béton

* * *

1. INTRODUCTION

Les structures du génie civil sont composées d'éléments métalliques répondant à la tenue mécanique et de béton permettant l'amélioration des propriétés mécaniques mais aussi et surtout à la protection des armatures vis-à-vis de l'environnement extérieur. Les agressions liées à l'environnement reposent principalement sur la pénétration d'agents chimiques qui conduisent à terme à la corrosion des aciers. Cette corrosion est le facteur critique de la tenue mécanique de la structure. Les bétons, même s'ils présentent initialement une porosité fine, permettent le blocage des agents chimiques. Cette action est largement dégradée en présence de fissures en surface du béton. La cinétique d'endommagement des bétons montre une première phase où les microfissures se développent jusqu'à un deuxième état où apparaissent les macrofissures dans lesquelles les agents chimiques progressent. Afin de détecter, le plus tôt possible, l'endommagement de la structure il est donc important de développer des outils de caractérisations adaptés aux milieux microfissurés. Dans le cadre d'une caractérisation in situ, l'accès à une seule face du massif de béton doit être considéré. Ce travail propose de répondre au besoin de caractérisation non destructive in situ de l'état de microfissuration de bétons à partir d'une face seulement.

Les méthodes ultrasonores sont potentiellement les plus performantes au regard de la pathologie considérée qui induit des modifications géométriques liées directement au comportement mécanique du matériau. Les microfissures remplies d'air ou d'eau présentent un fort contraste acoustique par rapport au béton ce qui va donner lieu à la diffusion des ondes dans le milieu. La présence de multidiffusion dans le béton est observée et augmente de manière générale avec la fréquence de l'onde [1]. Les solutions de caractérisation ultrasonore des milieux multidiffusants sont nombreuses et peuvent être traitées par des méthodes linéaires [2] ou non linéaires [3]. Si ces méthodes sont performantes selon les pathologies considérées, elles demandent souvent des conditions d'essais maîtrisées [2] qu'il est difficile de reproduire in situ. Ceci a pour effet de dégrader la qualité de mesure voire dans beaucoup de situation de rendre impossible ces mesures si l'on a accès une seule face de la pièce. L'étude de l'énergie diffusée dans les bétons [4] peut être mise en œuvre

expérimentalement à partir d'une seule face et présentent l'avantage d'être peu sensible aux mesures de distance et à la qualité de reproductibilité de couplage.

En présence d'obstacles dans le milieu de propagation, les ondes ultrasonores sont diffusées et l'on observe alors la décroissance de l'onde transmise cohérentes et l'apparition d'ondes diffusées. Ce phénomène s'accroît avec l'augmentation du contraste acoustique entre les obstacles et le milieu, avec l'augmentation du taux d'obstacle dans le milieu et lorsque la longueur d'onde devient comparable à la dimension des obstacles. On peut alors observer la disparition de l'onde cohérente au profit d'un ensemble d'ondes diffusées retardées, ce qui conduit à un allongement du signal dans le temps. Ces ondes diffusées une ou plusieurs fois sont appelées « ondes incohérentes » et correspondent à la superposition de trajets complexes liés aux différents parcours de diffusion possibles dans le milieu. Ces notions de diffusion et évolution de l'énergie sont initialement étudiées [5] pour des applications en géophysique. Il est alors montré que le champ incohérent peut être décrit par une approximation du régime de diffusion qui permet de définir les variations temporelles et spatiales de l'énergie diffusée. Dans les années 1990 à 2000 les premières applications en caractérisation non destructive sont proposées pour des alliages d'aluminium plus ou moins poreux [6] puis une première application sur des cylindre de béton [7]. Récemment, des variations de porosités [8] dans le ciment ou un endommagement par alcali-réaction de béton [9] sont reliés aux champs ultrasonores diffus. La sensibilité de cette méthode face à l'ouverture et la profondeur de fissures en surface est démontrée [4].

Nous analysons l'évolution de l'énergie ultrasonore diffusée face à un endommagement thermique de béton pour des niveaux de température allant de 20 à 400°C. Tout d'abord, nous rappelons les équations de base qui décrivent l'évolution de l'énergie diffusée et les approximations réalisées qui permettent l'obtention des paramètres de diffusion. Nous présentons ensuite les éprouvettes d'étude, l'ensemble de la chaîne expérimentale et les principes de traitement des signaux associés. Finalement nous commentons les résultats relatifs à l'évolution des paramètres avec l'endommagement thermique.

2. THÉORIE DE LA DIFFUSION DE L'ÉNERGIE ULTRASONORE

L'énergie ultrasonore en milieu hétérogène évolue selon un processus de diffusion supposé isotrope qui dérive de la théorie des transferts radiatifs. Cette solution est analogue à la diffusion de la chaleur dans les matériaux.

2.1. L'équation de diffusion

Pour les milieux atténuants un terme de dissipation de l'énergie est ajouté et l'évolution de la densité spectrale d'énergie répond l'équation différentielle suivante à ultrasonore au sein du matériau l'on obtient l'équation suivante [6] :

$$D \cdot \Delta \langle E(r, t) \rangle - \frac{\partial}{\partial t} \langle E(r, t) \rangle - \sigma \cdot \langle E(r, t) \rangle = P_0 \cdot \delta(r) \cdot \delta(t) \quad (1)$$

Où $\langle E(r, t) \rangle$ est la densité spectrale d'énergie pour une position r et un temps t donnés, D est le coefficient de diffusivité et σ est le coefficient de dissipation. Ces grandeurs dépendent également de la fréquence. Enfin δ représente le symbole de Kronecker et P_0 est la densité spectrale de puissance dépendant de la source utilisée.

Les obstacles étant positionnés de manière aléatoire, la densité spectrale d'énergie est considérée en quantités moyennes $\langle \rangle$. Ce caractère aléatoire de position et d'orientation permet de considérer le matériau comme isotrope et les coefficients de diffusion ne dépendent donc pas de la direction de propagation des ondes ultrasonores.

La diffusivité D ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) dépend de la structure du matériau, elle est donc caractéristique du chemin de diffusion lié aux granulats et microfissures présents dans la matrice [6]. La dissipation σ (s^{-1}) est liée aux propriétés viscoélastiques du milieu, elle est donc caractéristique de l'atténuation par absorption principalement liée à la qualité de la matrice cimentaire [7].

2.2. Solutions particulières de l'équation de diffusion

La condition temporelle initiale est donnée par :

$$\langle E(r, t) \rangle = 0 \text{ pour } t \leq 0 \quad (2)$$

Pour une caractérisation au contact, les surfaces de la pièce sont en contact avec l'air et les conditions aux frontières prennent en compte qu'aucune énergie n'est transmise à l'extérieur du domaine :

$$\nabla \langle E(r, t) \rangle = 0 \quad \forall r \in \partial \Omega \quad (3)$$

Il est alors possible de déterminer les solutions particulières pour différentes configurations spatiales. Le modèle 1D est applicable pour les géométries élancées et permet d'obtenir des solutions représentatives pour la diffusion des ondes suivant l'axe d'un cylindre [7]. Les modèles 2D s'applique aux géométries dont une dimension [8] est grande par rapport aux deux autres alors que la solution 3D s'affranchit des conditions limites et s'applique donc à des structures dont les limites sont éloignées. Dans le cadre d'essais en laboratoire sur des éprouvettes parallélépipédiques de dimensions finies le modèle 3D fini est le plus adapté. Deroo et al [9] montrent cependant la grande complexité de cette solution qu'il compare à une solution 3D infini dont les résultats sont proches tout en présentant une grande robustesse.

Compte tenu des géométries de nos éprouvettes et de la configuration de contrôle à partir d'une face seulement nous retenons la solution pour une géométrie 2D permettant la prise en compte des conditions aux limites sur la face d'appui des capteurs :

$$\langle E(x, y, t) \rangle = E_0 \frac{1}{4\pi Dt} e^{-r^2/4Dt} e^{-\sigma t} \quad (4)$$

Cette solution a montré de bons accords dans le cadre d'une application en surface sur un cylindre [8].

3. PLAN EXPÉRIMENTAL

L'évolution de l'énergie ultrasonore est étudiée pour une formulation standard donnée et des éprouvettes ayant subi différents niveaux de sollicitations thermiques.

3.1. Eprouvettes

Les éprouvettes (figure 1) sont de formes parallélépipédiques ($25 \times 15 \times 8 \text{ cm}^3$) adaptées à des mesures ultrasonores à partir d'une seule face et permettant le chauffage à cœur sur des courtes durées.

La formulation retenue correspond à un béton standard (tableau 1).

Afin d'obtenir des taux et tailles de microfissures différents, les éprouvettes ont été endommagées thermiquement à des températures différentes de 20° , 120° , 250° et 400°C .

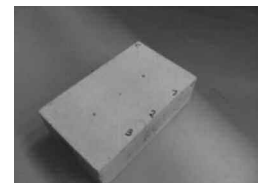


Figure 1 : Eprouvettes

Constituant	Quantité ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Ciment CEM 32.5	370
Sable 0/4 mm	770
Granulat 4/12 mm	1070
Eau	210

Tableau 1 : Formulation du béton

3.2. Chaîne de mesure

La chaîne de mesure (figure 2) est composée d'un générateur impulsif (Panametric 5058PR) relié à un traducteur émetteur (Panametric V101) de fréquence nominale 500 kHz et de diamètre 25,4 mm. Le signal diffusé est reçu sur un oscilloscope (Lecroy WS424), par l'intermédiaire d'un transducteur récepteur (EPA Pico) de bande passante de 200 à 700 kHz et de diamètre 4 mm.

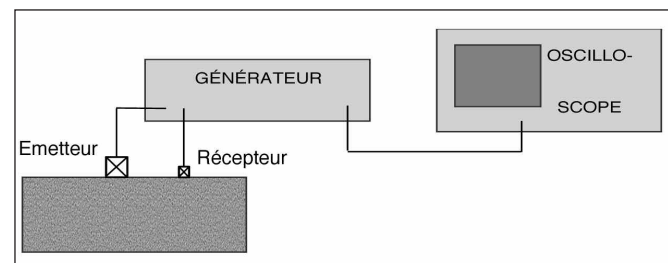


Figure 2 : Chaîne de mesure

3.3. Traitement des signaux

Les signaux (figure 3) sont obtenus entre l'émetteur et le récepteur positionnés en surface de l'éprouvette pour une distance de parcours de 60 mm. Le capteur émetteur per-

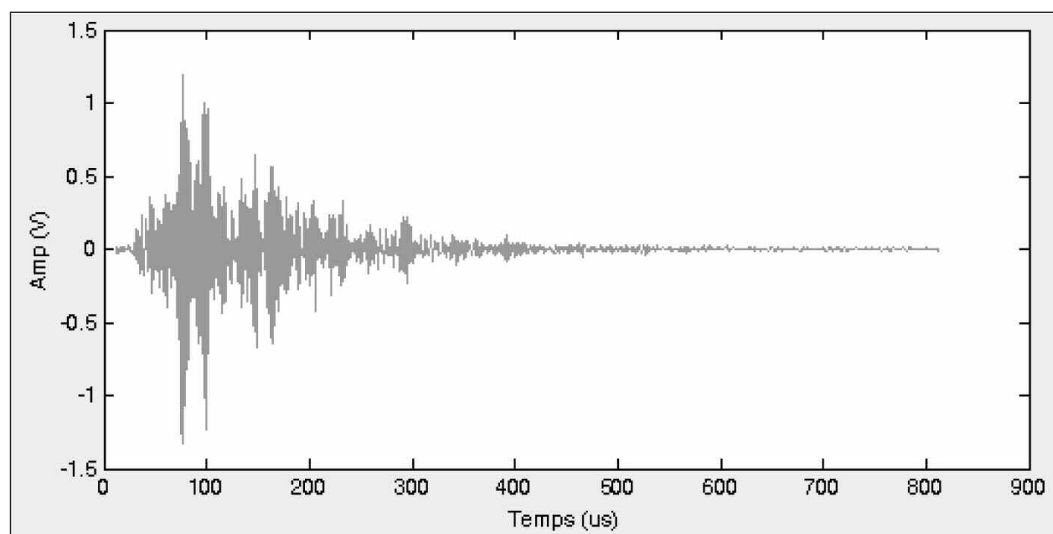


Figure 3 : Signal temporel des ondes diffusées en surface ($f_c=500\text{kHz}$, $d=60\text{mm}$, éprouvette saine 20°C)

met la génération des ondes ultrasonores autour de 500 kHz. Cela correspond au domaine fréquentiel où la longueur d'onde est comparable aux obstacles présents dans le milieu (granulats et microfissures). On observe bien, dans le signal proposé, l'absence d'onde cohérente dans les premiers instants du signal puis une superposition d'ondes diffusées dont la durée est importante.

Pour chaque éprouvette une série de 16 signaux sont obtenus à des positions différentes. Chaque signal est traité en analyse temps-fréquence de l'énergie diffusée à partir du spectrogramme proposé par Matlab®. Les spectrogrammes obtenus pour chaque éprouvette sont moyennés puis les enveloppes temporelles moyennes sont extraites pour les fréquences souhaitées (figure 4).

La courbe enveloppe est approximée à partir de l'équation 4, ce qui permet de déterminer la diffusivité D et la dissipation s . En recherchant le maximum de la courbe enveloppe nous pouvons extraire l'ATME (le temps d'arrivée du maximum de l'énergie).

4. EVOLUTION DES PARAMÈTRES DE DIFFUSION AVEC L'ENDOMMAGEMENT THERMIQUE

Dans un premier temps nous observons les différences qualitatives entre un béton sain (20°C) et un béton endommagé (400°C) à partir des images temps-fréquence moyennes (figure 5) tirées des 16 signaux par éprouvette. On remarque que la concentration de l'énergie ultrasonore est plus forte dans le béton sain alors qu'elle se trouve diluée dans le temps pour le béton endommagé. Ceci correspond à la croissance de la diffusion dans l'éprouvette lié au développement des microfissures. On constate également une légère atténuation des plus hautes fréquences dans le début du signal. Les fréquences les plus représentées dans les deux spécimens sont voisines de 400 kHz, valeur que nous avons choisie pour extraire les données relatives à la diffusion.

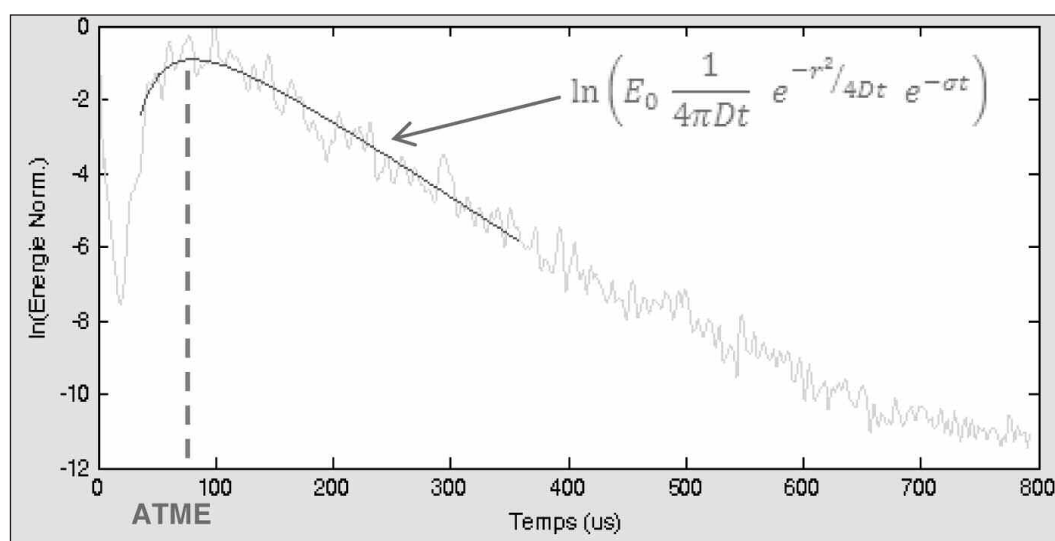


Figure 4 : Enveloppe moyenne des ondes diffusées ($f=400\text{kHz}$, $d=60\text{mm}$, éprouvette saine 20°C)

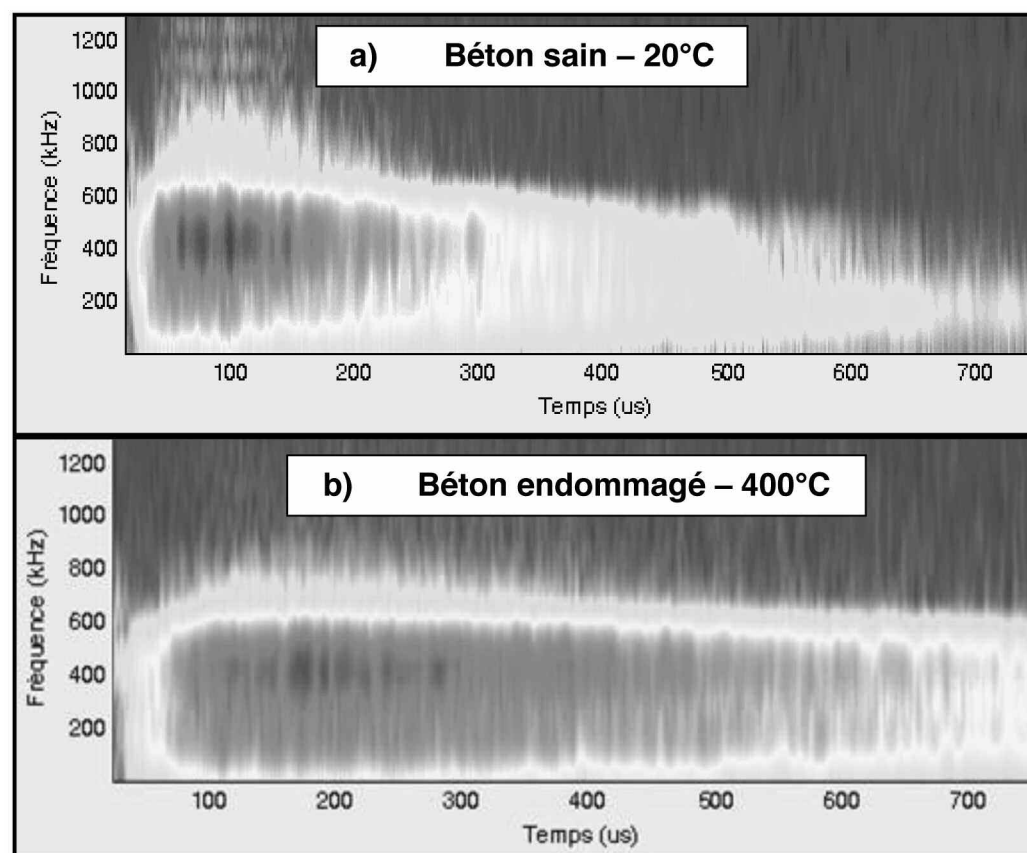


Figure 5 : Spectrogramme moyen a) Béton sain (20°C)– b) Béton endommagé (400°C)

Nous constatons une décroissance de la diffusivité et de la dissipation avec l'endommagement thermique et également une augmentation du temps d'arrivée du maximum d'énergie. Les comportements de la diffusivité (D) et du temps d'arrivée du maximum d'énergie (ATME) sont en accord avec la littérature [9] et s'expliquent par l'augmentation du nombre et de la taille des diffuseurs : cela conduit à des chemins de diffusion plus complexes donc plus longs. La décroissance de la dissipation est en accord relatif avec Deroo [9] qui observe suivant les cas une décroissance avec l'alcali-réaction mais qui n'est pas systématique. Punurai [8] observe une décroissance de la dissipation avec l'augmentation des porosités dans les bétons, il explique cela par la différence de volume relatif de la matrice de ciment à caractère dissipatif. Dans notre

cas les microfissures étant d'ouverture très faible il est difficile d'évoquer de différence de volume de matrice.

5. CONCLUSION

Cette étude montre la sensibilité des ondes diffusées aux évolutions micro-structurelles d'un béton. En particulier, deux paramètres de diffusion présentent des comportements systématiques et évolutifs avec l'endommagement donc avec l'augmentation de la microfissuration dans le ciment. Une étude complémentaire pourrait montrer une plus grande robustesse dans le calcul de l'ATME a été remarquée et devra être confirmée par l'évaluation des incertitudes de mesure concernant ces deux paramètres.

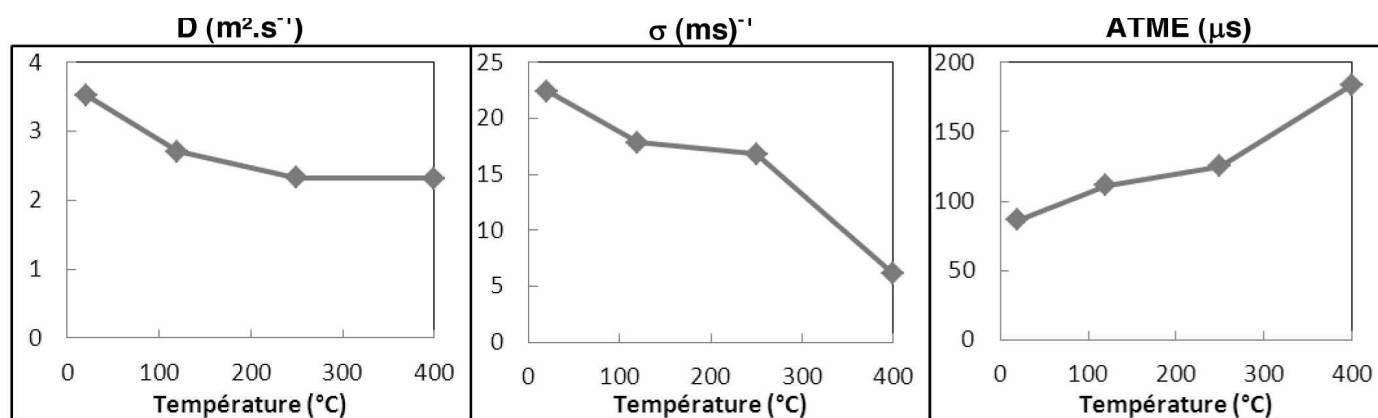


Figure 6

RÉFÉRENCES

- [1] D.G. Aggelis, T.P. Philippidis. Ultrasonic wave dispersion and attenuation in fresh mortar, *NDT&E International* 37 (2004) 617–631.
- [2] J.F. Chaix, M. Rossat, V. Garnier, G. Corneloup. An experimental evaluation of two effective medium theories for ultrasonic wave propagation in concrete, *J. Acoust. Soc. Am.* 131, 2012, 4481–4490.
- [3] C. Payan, V. Garnier, J. Moysan, P.A. Johnson. Applying non-linear resonant ultrasound spectroscopy to improving thermal damage assessment in concrete, *J. Acoust. Soc. Am.* 121, 2007, 125–130.
- [4] A. Quiviger, C. Payan, J.F. Chaix, V. Garnier, J. Salin. Effect of the presence and size of a real macro-crack on diffuse ultrasound in concrete, *NDT&E International* 45 (2012) 128–132.
- [5] K. Aki. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves, *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, 615–31.
- [6] R. Weaver. Ultrasonics in an aluminium foam, *Ultrasonics* 36, 1998, 435–442.
- [7] P. Anugonda, J. Wiehn, J. Turner. Diffusion of ultrasound in concrete, *Ultrasonics* 39, 2001, 429–435.
- [8] W. Punurai, J. Jarzynski, J. Qu, J.Y. Kim, L.J. Jacobs, K.E. Kurtis. Characterization of multi-scale porosity in cement paste by advanced ultrasonic techniques, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 38–46.
- [9] F. Deroo, J.Y. Kim, J. Qu, K. Sabra, L.J. Jacobs. Detection of damage in concrete using diffuse ultrasound. *J. Acoust. Soc. Am.* 127, 2010, 3315–3318.