

ÉTUDE DE L'ÉVALUATION ULTRASONORE DES CONTRAINTES DANS LES BÉTONS

STUDY OF ULTRASONIC EVALUATION OF STRESSES IN CONCRETE

J.F Chaix, I. Lillamand, M.A. Ploix, V. Garnier, G. Corneloup.
LCND, Université de la Méditerranée
IUT Aix Provence, avenue Gaston Berger, 13625 Aix-en-Provence Cedex, France

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le projet ANR ACTENA qui concerne la détermination de la tension résiduelle des câbles non accessibles. Cet aspect non accessible du câble nous a conduit à travailler sur le massif de béton précontraint par le câble et à proposer une évaluation de la contrainte dans ce massif. L'étude bibliographique a mis en avant le peu d'études concernant le sujet. Nous proposons donc une faisabilité de l'application de la théorie de l'acousto-élasticité au cas du béton. Cette théorie s'appuie sur le caractère non linéaire de l'élasticité des matériaux qui permet de lier les évolutions des vitesses des ondes ultrasonores avec celles des contraintes. Nous avons suivi ces vitesses sur plusieurs formulations de béton (présentant un caractère incrémental du taux de roche dans le béton) et sur des échantillons de roche soumis à une contrainte uni-axiale de compression. En parallèle nous avons relevé les lois de comportement mécanique. Les évolutions de vitesse et les lois de comportement ont montré la présence de non linéarité dans le matériau. L'acousto-élasticité dans le béton a été mise en évidence. Des évolutions différentes ont été relevées en fonction de la formulation. Les mesures montrent que le suivi des contraintes dans le béton en laboratoire est possible. Quelques perspectives de ce travail concernant le développement de mesures in situ sont proposées.

Abstract

This study is done in a French research project called "ANR ACTENA". It concerns the evaluation of the residual stresses in non accessible cables. The non accessible aspect leads us to work on the concrete (surrounding medium) which is pre-stressed by the cable. We propose to evaluate the stress states in this surrounding medium. We found only few papers on this subject and so we work on the feasibility to use acousto-elasticity for concrete media. This theory is based on non linear elasticity of materials which links the ultrasonic velocities with mechanical stresses. We studied the velocities ultrasonic waves which propagate through different concretes and through rock specimens. There are submitted to uni-axial loading (compressive testing). The constitutive laws have been acquired. The velocities evolutions and the laws displayed the non linear behaviour of concrete. Different mechanic and ultrasonic behaviours are noted for each formulation. The tests show that evaluating stresses in concrete is possible in laboratory conditions. The main purpose of the present study concerns the development of in situ measurements.

1. INTRODUCTION

Le problème général posé par le projet ACTENA concerne l'auscultation des câbles tendus non accessibles, avec pour but final la détermination de la tension résiduelle. Le raisonnement que nous avons privilégié consiste à s'intéresser aux conséquences plutôt qu'aux causes. Nous avons ainsi proposé d'essayer de caractériser les tensions résiduelles non pas au niveau des câbles, mais plutôt au niveau du champ de contraintes transféré aux massifs de béton environnant les câbles, qui eux sont accessibles.

2. THEORIE DE L'ASCOUSTO-ELASTICITE

L'intégration dans les équations de mouvement de lois de comportement élastique non linéaire de matériaux conduit à une dépendance des vitesses ultrasonores par rapport à la déformation du matériau, et donc également par rapport au niveau de contrainte auquel est soumis le matériau.

S'appuyant sur les travaux de Murnaghan [1] concernant l'élasticité non linéaire en milieu isotrope, Hughes et Kelly [2] obtiennent pour la première fois les relations entre les vitesses ultrasonores et les déformations dans un milieu isotrope sous pression hydrostatique. Ils concluent sur la possibilité d'évaluer les constantes de Murnaghan (ℓ, m, n) par la mesure du temps de transmission d'ondes élastiques.

Pour un milieu soumis à un chargement uni-axial dans la direction 1 (2 et 3 étant perpendiculaires), les vitesses des ondes élastiques s'écrivent [2] en fonction de la contrainte:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_o V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[2\ell + \lambda + \frac{\lambda + \mu}{\mu} (4m + 4\lambda + 10\mu) \right] \\ \rho_o V_{12}^2 = \rho_o V_{13}^2 = \mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m + \frac{\lambda n}{4\mu} + 4\lambda + 4\mu \right] \\ \rho_o V_{22}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[2\ell - \frac{2\lambda}{\mu} (m + \lambda + 2\mu) \right] \\ \rho_o V_{21}^2 = \mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m + \frac{\lambda n}{4\mu} + \lambda + 2\mu \right] \\ \rho_o V_{23}^2 = \mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m - \frac{\lambda + \mu}{2\mu} n - 2\lambda \right] \end{array} \right. \quad (1)$$

avec $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ le module de compressibilité.

En linéarisant au premier ordre, ce système peut se réécrire sous la forme :

$$V_{ij}^{\sigma_{11}} = V_{ij}^o \left(1 + A_{ij} \sigma_{11} \right) \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_{ij}^{\sigma_{11}} - V_{ij}^o}{V_{ij}^o} = \frac{\Delta V_{ij}}{V_{ij}^o} = A_{ij} \sigma_{11} \quad (3)$$

où $V_{ij}^{\sigma_{11}}$ est la vitesse de l'onde se propageant dans la direction i et ayant un déplacement particulière dans la direction j dans un milieu soumis à une contrainte uni-axiale σ_{11} dans la direction 1. V_{ij}^o est la vitesse de l'onde se propageant dans la direction i ayant un déplacement particulière dans la direction j dans le même milieu non contraint ($\sigma_{11} = 0$). A_{ij} sont les constantes acousto-élastiques dépendant des coefficients de Lamé (λ, μ) et de ceux de Murnaghan (ℓ, m, n).

3. BETON ET ULTRASONS

3.1. Composition du béton

Le béton est un matériau composite formé de deux phases solides: il se présente sous forme d'une matrice à base de ciment, et d'inclusions rocheuses (60 à 70% en volume). La fabrication du béton met en jeu un liant de type ciment, du sable, des gravillons et de l'eau. D'autres éléments, appelés adjuvants, peuvent compléter en faibles quantités la formulation. Le rapport eau sur ciment (E/C) est une donnée caractéristique des formulations de béton. Il est en général compris entre 0,3 et 0,6. Les caractéristiques du béton dépendent de celles du ciment et de celles des roches entrant dans la composition (cf. tableau 1).

Matériau	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité E (MPa)	Coeff. de Poisson ν
Roche	2 600 - 2 700	60 000 - 90 000	0,2 - 0,3
Ciment CPA	~ 2 100	30 000 - 40 000	0,2 - 0,3

Tableau 1: Caractéristiques moyennes des roche et ciment.

La prise du béton met en jeu des mécanismes chimiques, mécaniques et thermiques. Une partie de l'air, présent lors de la fabrication, reste emprisonnée dans la pâte de ciment ou aux interfaces pâte/granulats sous forme de pores. Le taux de porosité est généralement compris entre 10 et 25%, et les dimensions des pores varient de l'angström au dixième de micromètre [3, 4]. Ces pores, initialement présents, influent sur les caractéristiques du béton mais aussi sur leurs évolutions lors de sollicitations.

3.2. Modèles de comportement mécanique du béton

Le comportement mécanique général décrit dans la littérature présente ce matériau comme élastique, fragile et endommageable [5]. La partie élastique est modélisée de manière linéaire ou non linéaire [6] selon les besoins auxquels doivent répondre ces modèles. Il apparaît que le comportement élastique en compression est non linéaire mais il ne semble pas établi de limite bien marquée de ce domaine avec un domaine présentant un endommagement du matériau sous forme d'évolution de microfissures [7] dans la matrice de ciment. La diversité de formulation des bétons conduit à un large éventail de matériaux ayant des caractéristiques mécaniques très variées.

3.3. Mesures ultrasonores et béton sous contraintes mécaniques

Peu de travaux ont été menés sur l'influence de l'état de contrainte sur la propagation des ondes ultrasonores dans le béton. Popovics [8], Berthaud [9], Wu [10] et Qasrawi [11] sont les principaux auteurs d'articles à ce sujet.

Le caractère hétérogène du béton rend l'exploitation des signaux ultrasonores difficile et les mesures réalisées pour l'instant dans des bétons sous contraintes mécaniques de compression n'ont pas mis en évidence un comportement acousto-élastique [8]. Cependant ces mesures de vitesse n'ont été effectuées que très rarement dans la direction de chargement et souvent pour un seul type d'onde, les ondes longitudinales [9].

Le faible nombre d'études du comportement acousto-élastique et l'évolution des méthodes de mesure nous a conduit à proposer une étude de faisabilité complète de mesure de vitesses ultrasonores longitudinale et transversale sur plusieurs compositions soumises à des contraintes de compression uni-axiale.

4. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

4.1. Composition et géométrie des éprouvettes

Les éprouvettes de ce programme d'essais sont de géométrie cylindrique de différents diamètres compris entre 53 et 160mm et le coefficient d'allongement (L/D) est proche de 2 afin de pouvoir réaliser des essais de compression. Les différents diamètres permettent d'adapter la géométrie des éprouvettes à celle des traducteurs ultrasonores. Afin d'étudier l'influence de la distribution des granulats, cinq compositions (cf. tableau 2) ont été étudiées (M=Mortier, M+4/10=Mortier et Granulats 4/10, M+10/16= Mortier et Granulats 10/16, BHP=Béton Haute Performance, BO=Béton Ordinaire).

Constituant	M	M+4/10	M+10/16	BHP	BO
Ciment CPA 52.5	660	550	475	415	350
Eau	300	250	215	187	185
Adjuvant	6,6	5,5	4,8	4,1	764
Sable 0/4	1375	1150	985	865	-
Granulats 4/10	-	470	-	355	-
Granulats 10/16	-	-	810	710	-
Granulats 4/8	-	-	-	-	423
Granulats 8/12	-	-	-	-	276
Granulats 12/20	-	-	-	-	376

Tableau 2 : Compositions des bétons testés (quantités en $kg.m^{-3}$).

De plus, une éprouvette (parallélépipédique) de roche a été également étudiée, elle est issue de la roche utilisée pour obtenir les sables et granulats.

Les résistances à la compression (R_c) et modules d'Young (E) de ces différents matériaux ont été mesurées par des essais destructifs (par le Centre d'Etude et Technique du ministère de l'Equipement, cf. tableau 3).

Paramètre	M	M+4/10	M+10/16	B	BII	Roche
R_c (MPa)	87,7	82,9	79	76,6	50	205
E (GPa)	32	35	39,5	42,8	30	80,4

Tableau 3 : Résistances à la compression et modules d'Young.

Certaines éprouvettes sont instrumentées à l'aide de jauges de déformation de longueur 50 ou 100 mm selon leur longueur et la taille des plus gros granulats.

4.2. Dispositif de chargement de compression

Nous avons utilisé un dispositif de chargement des éprouvettes permettant le positionnement des traducteurs ultrasonores dans l'axe et perpendiculaire à l'axe de chargement. Le passage des capteurs dans l'axe de chargement impose une zone circulaire de contrainte nulle au centre de la face d'appui, ce qui, notamment pour les petites éprouvettes, induit une répartition non homogène de la contrainte de compression sur l'axe de l'éprouvette (cf. figure 1).

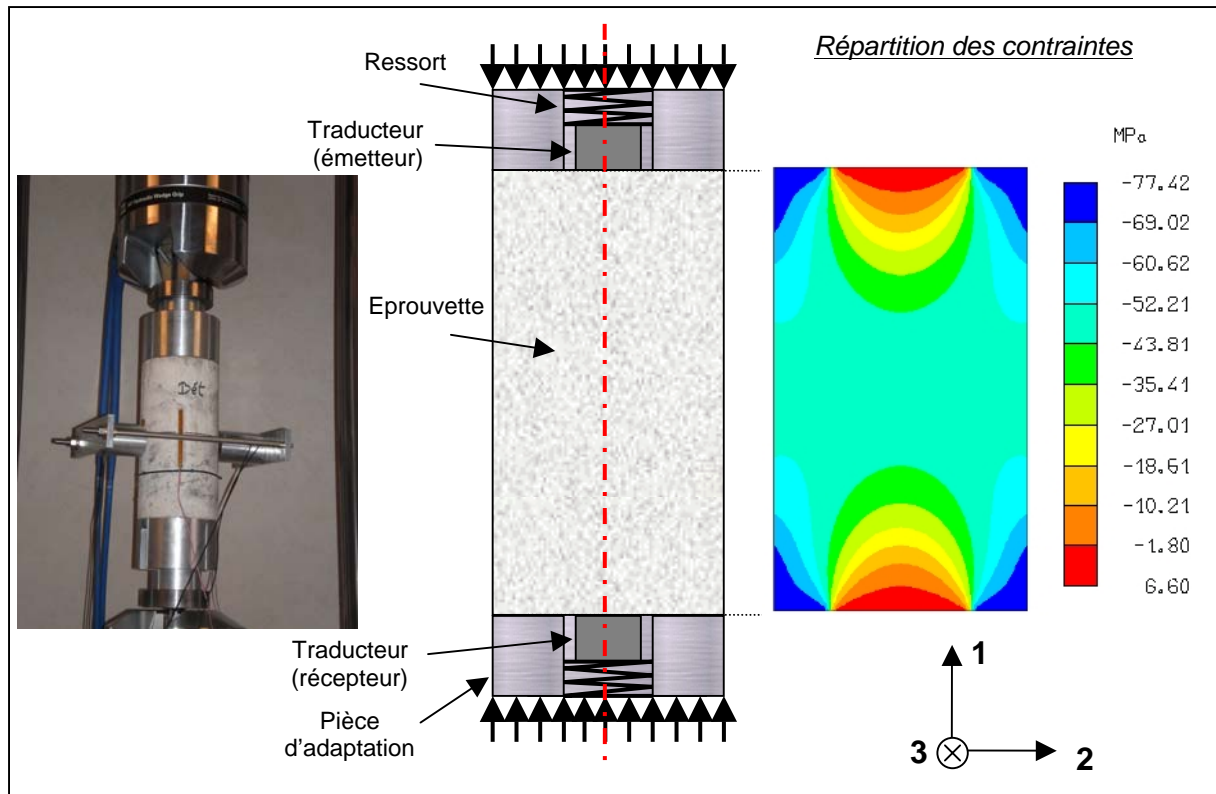


Figure 1 : Dispositif de mise en charge.

Le dispositif permet d'avoir un effort de couplage constant sur le capteur par l'utilisation de ressorts de compression. Une précharge de positionnement est appliquée.

4.3. Dispositif de mesures ultrasonores

Cinq types d'ondes ont été étudiés (cf. figure 2) pour chaque éprouvette : deux dans la direction de chargement (L1 et "T1..."), et trois dans la direction perpendiculaire au chargement (L2, T21, T23).

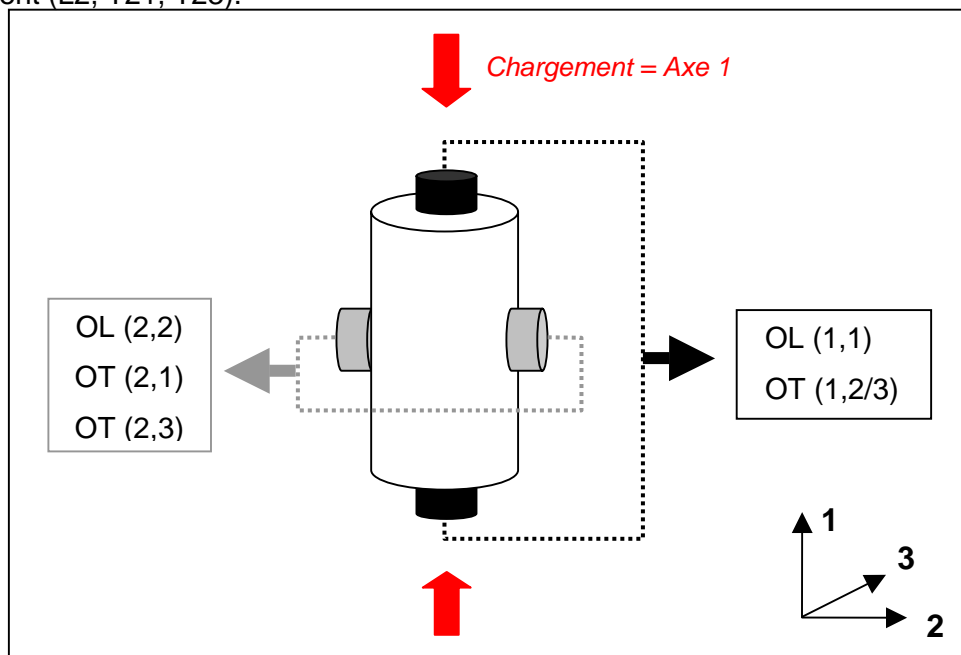


Figure 2 : Configuration des tirs ultrasonores

Les essais ultrasonores sont réalisés à partir d'un générateur Sofranel 5058PR, d'un oscilloscope Lecroy WS424 et de transducteurs ultrasonores à large bande (de fréquence centrale 500 kHz). Les mesures de variations des vitesses ultrasonores présentées ont été obtenues par intercorrélation entre le signal de référence à charge nulle et le signal obtenu à chaque incrément de charge en compression.

5. RESULTATS MECANIQUE ET ULTRASONORE

5.1. Lois de comportement

A partir des relevés des jauges d'extensométrie nous avons tracé les lois de comportement expérimentales associées aux éprouvettes et matériaux testés. Pour chacun des relevés nous avons identifié, par des régressions non linéaires, les modèles associés les plus proches des valeurs expérimentales (cf. figure 3).

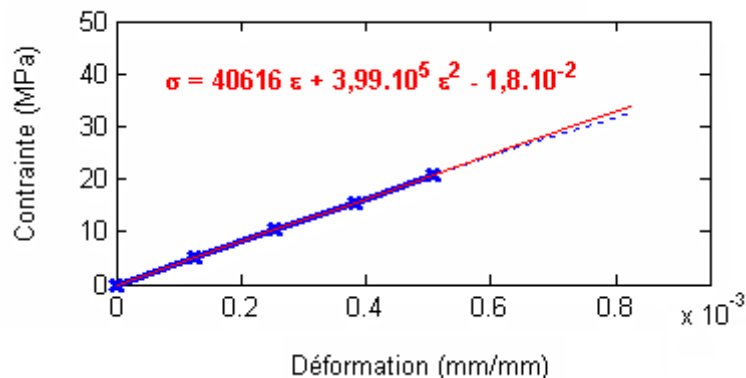


Figure 3 : Loi de comportement du béton

Il a été mis en évidence, par ces travaux, un comportement non linéaire lors de la montée en charge. Selon le niveau de contrainte atteint dans l'éprouvette, des comportements hystérétiques et des déformations plastiques après décharge ont été également observés (pour des niveaux de contraintes supérieurs à 30% de R_c). Ces éprouvettes présentent certainement un endommagement lié à ces déformations.

5.2. Variation des vitesses ultrasonores

Nous présentons les résultats obtenus pour les variations de vitesse du milieu sous contrainte par rapport à la vitesse du milieu à contrainte nulle, normalisées par cette dernière vitesse ($\Delta V/V^0$) en fonction de la contrainte axiale moyenne dans le milieu (cf. éq. 3). La pente des courbes obtenues sont à rapprocher des coefficients acousto-élastique du milieu. Les résultats obtenus sur le mortier (cf. figure 4) montrent un comportement général représentatif de l'ensemble des résultats obtenus. Nous montrerons donc sur cette éprouvette les résultats de mesure des vitesses ondes longitudinales et transversales qui se propagent dans les directions 1 et 2 et polarisées dans les directions 1, 2 et 3.

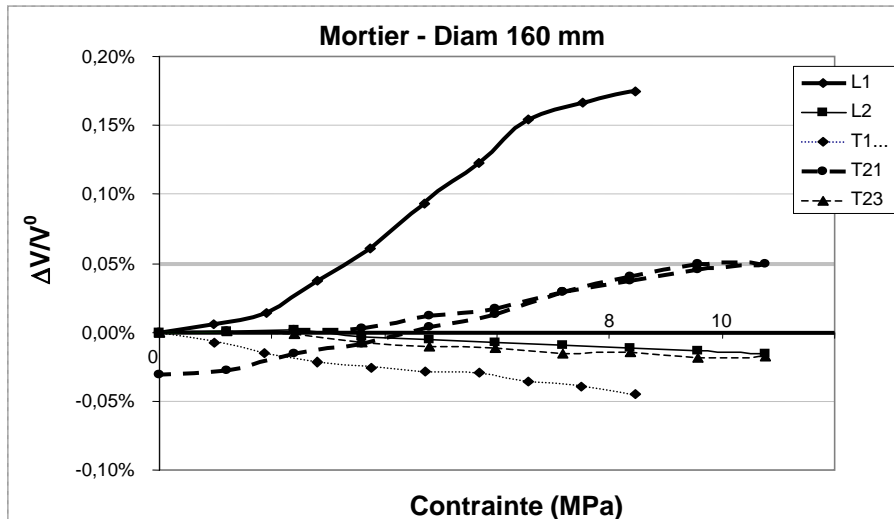


Figure 4: Evolution des vitesses des ondes en fonction de la contrainte pour le mortier.

Comme attendu, les ondes les plus sensibles à la contrainte correspondent au mode longitudinal dans la direction de chargement (L1), et au mode transversal se propageant perpendiculairement au chargement et polarisé dans la direction de chargement (T21). On observe peu de différence entre les phases de charge et décharge (peu ou pas d'hystérésis observée) seul un léger décalage non significatif entre le point de départ et le point d'arrivée (par exemple 0,03% d'écart pour T21).

Les figures suivantes (figures 5 à 8) ne présenteront que les deux modes les plus sensibles avec uniquement les courbes de chargement. Nous détaillerons alors le comportement de ces deux ondes en fonction de la variation de contrainte dans les différents milieux auscultés.

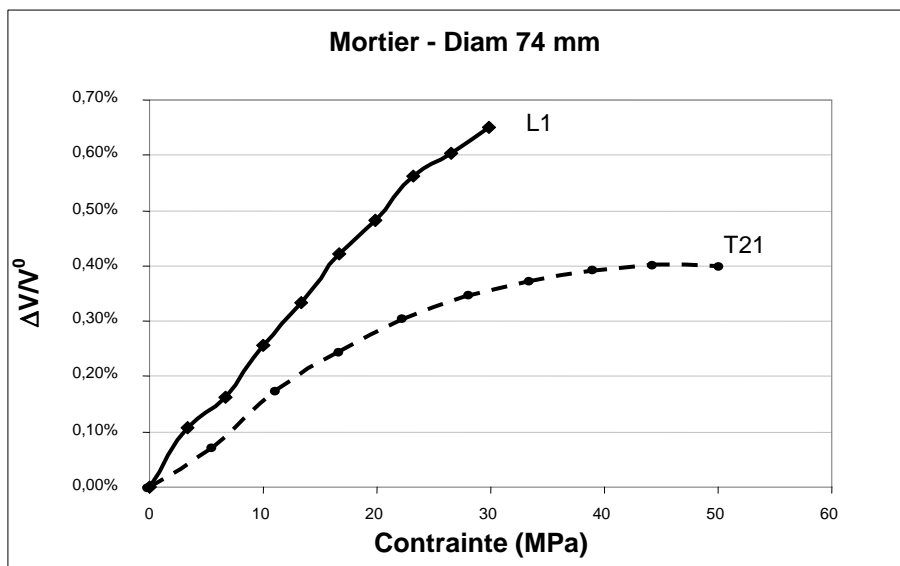


Figure 5: Evolution des vitesses (L1 et T21) en fonction de la contrainte pour le mortier

Les courbes obtenues dans le mortier (cf. figure 5), quelles que soient les dimensions de l'éprouvette, montrent systématiquement une augmentation de la vitesse avec la contrainte dans le milieu. Les variations obtenues permettent de conclure quant à la présence d'un comportement non linéaire du mortier. Les variations relatives obtenues sont largement supérieures à celles des matériaux poly-cristallins tels que l'acier [12].

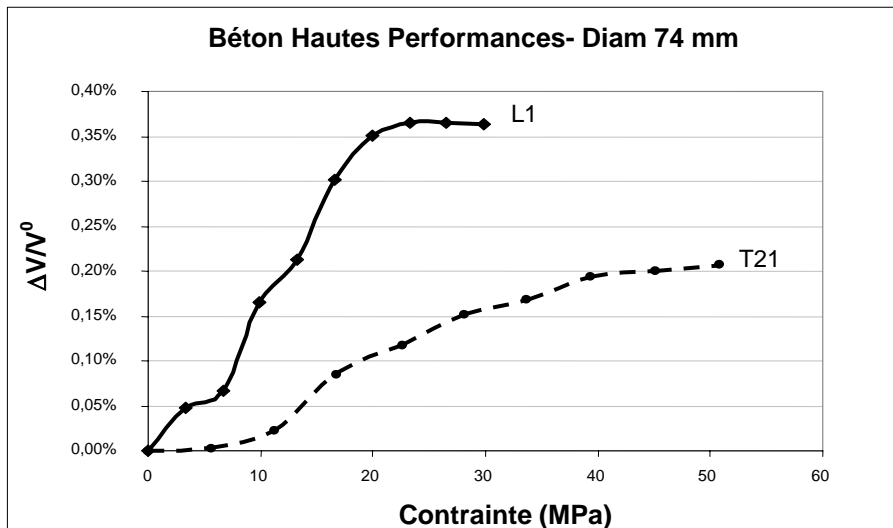


Figure 6: Evolution des vitesses (L1 et T21) en fonction de la contrainte pour le béton BHP

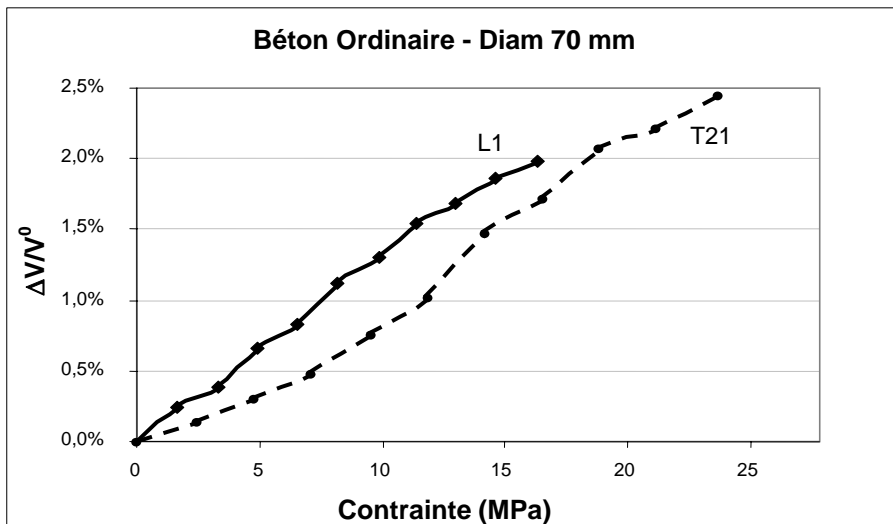


Figure 7: Evolution des vitesses (L1 et T21) en fonction de la contrainte pour le béton BO

Les courbes obtenues dans les bétons (cf. figures 6 et 7) sont similaires à celles obtenues dans le mortier, elles montrent une augmentation de la vitesse avec la contrainte dans le milieu. Pour un même niveau de contrainte, les courbes montrent une différence d'amplitude de variation de vitesse en fonction du milieu (à 10 MPa par ex. pour l'OL, delta V/V vaut 0,25% pour le mortier, 0,17% pour le béton BHP et 1,3% pour le béton BO).

Les variations obtenues permettent de conclure à la présence d'un comportement non linéaire des mortiers et bétons. On note également une variabilité de la dynamique d'évolution en fonction de la composition, la non linéarité des bétons ordinaires est plus prononcée que celle des bétons hautes performances.

Ces différentes observations sont certainement liées à la multi-diffusion présente dans les bétons et aux différences de comportements acousto-élastiques dans les granulats par rapport aux comportements dans les ciments et mortiers.

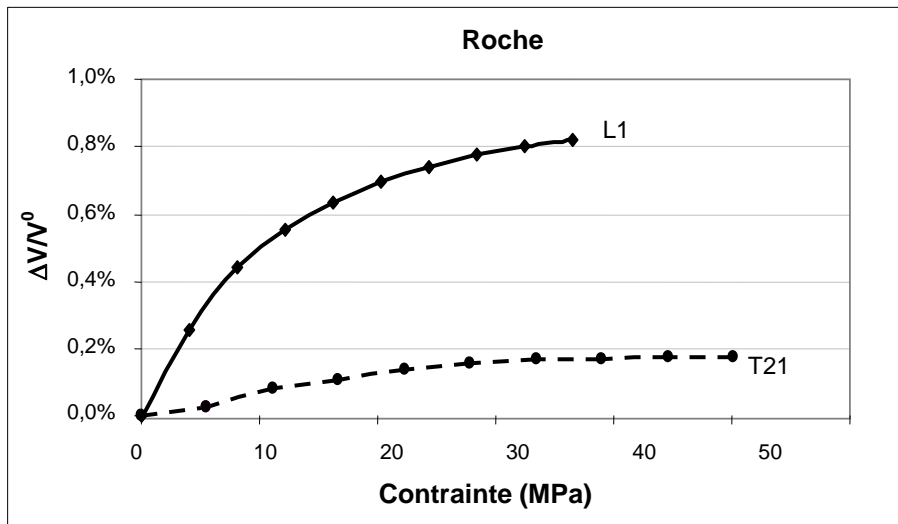


Figure 8: Evolution des vitesses (L1 et T21) en fonction de la contrainte pour la roche

Les courbes obtenues dans les roches (cf. figure 8) sont globalement similaires à celles obtenues dans les éprouvettes de type béton et l'on constate l'augmentation de la vitesse avec la contrainte dans le milieu. Cependant on peut remarquer que leur évolution en fonction de la contrainte semble moins linéaire que pour les autres éprouvettes et que les écarts entre les courbes des vitesses des ondes longitudinales et celles des ondes transversales sont plus marqués que dans les mortiers et bétons.

Ces écarts plus marqués (entre L1 et T21) rapprochent le comportement des roches à celui des aciers [12], l'absence de multi-diffusion qui tend à moyenniser les grandeurs dans l'espace est certainement à l'origine de ces observations.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude bibliographique a montré la difficulté de modéliser le comportement mécanique du béton en général. Elle a également mis en évidence le manque d'essais d'acousto-élasticité dans le béton dans la littérature. L'étude expérimentale a montré clairement que la vitesse ultrasonore varie en fonction de la contrainte uni-axiale appliquée au béton. Les ondes les plus sensibles à cette contrainte sont les ondes longitudinales et les ondes transversales polarisées dans la direction de chargement. Les mesures d'acousto-élasticité montrent que le béton peut être de 10 à 100 fois plus "acousto-élastique" que l'acier, cependant les valeurs de variation de vitesse obtenues sont faibles vis-à-vis des difficultés de mesure dans ce milieu. Cette technique semble, de ce point de vue, difficilement transposable in situ.

Par contre, une mesure par la technique de l'analyse de la Coda (partie finale du signal US) peut être mise en place et permet d'une part de s'affranchir de la distance et d'autre part, elle conduit à des mesures de variation de temps plus importantes car la mesure s'effectue tard dans le signal. Cette technique a un réel potentiel in situ que nous mettons en évidence par une étude en cours.

Pour conclure, il est clair que cette première étude montre que l'évaluation de contraintes dans le béton est délicate à mettre en œuvre à ce jour in situ. La solution pour répondre à ce problème est de se tourner vers des techniques nouvelles telles que l'analyse de la Coda ou l'acoustique non linéaire.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Agence Nationale pour la Recherche et Electricité De France pour leurs soutiens financiers à ce programme de recherche. Les auteurs remercient également le Centre d'Etude et Technique du ministère de l'Equipement Méditerranée pour la fabrication des éprouvettes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Murnaghan T.D., Finite deformation of an elastic solid, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1951.
- [2] Hughes D.S., Kelly J.L., Second-order deformation of solids, Physical Review, Vol. 92, No. 5, 1953, pp.1145-1149.
- [3] Corneloup G., Garnier V., Etude bibliographique sur le contrôle non destructif des bétons, Contrat CEA-SERAM (Rapport interne), 1995.
- [4] Grattan-Bellew P.E., Micro-structural investigation of deteriorated Portland cement concretes, Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 1, 1996, pp. 3-16.
- [5] Mazars J., Millard A., Comportement dynamique des bétons et génie parasismique, Hermès Sciences, 2004, 390 pages.
- [6] Exadaktylos G.E., Vardoulakis I., Kourkoulis S.K., Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams - I. Technical theory, International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, 2001, pp. 4091-4117.
- [7] Feng X.Q., Yu S.W., Micromechanical modelling of tensile response of elastic-brittle materials, International Journal of Solids and Structures, Vol. 32, No. 22, 1995, pp. 3359-3372.
- [8] Popovics S., Popovics J.S., Effect of stresses on the ultrasonic pulse velocity in concrete, Materials and Structures, Vol. 24, 1991, pp. 15-23.
- [9] Berthaud Y., Damage Measurement in Concrete via an Ultrasonic Technique - Part I Experiment, Cement and concrete research, Vol. 21, 1991, pp. 73-82.
- [10] Wu T.T., Lin T.F., The stress effect on the ultrasonic velocity variations of concrete under repeated loading, ACI Materials Journal, Vol. 95, No. 5, 1998, pp.519-524.
- [11] Qasrawi H.Y., Marie I.A., The use of USPV to anticipate failure in concrete under compression, Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, pp. 2017-2021.
- [12] Chaki S., Etude d'une méthode ultrasonore absolue d'évaluation des contraintes : Application au contrôle des boulons, Thèse de Doctorat, Université de la Méditerranée, 2003, 180 pages.