



Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

INFLUENCE DES NIVEAUX DES CONTRAINTES AXIALES DE COMPRESSION SUR LA VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES ULTRA SONORS DANS LE BÉTON

**INFLUENCE OF AXIAL COMPRESSIVE STRESS ON THE VELOCITY
OF ULTRASONIC WAVES IN CONCRETE MATERIAL**

A. TOUKAL^{1(a)}, A. BELAKROUF^{2(b*)}, BOUSSAA LEILA^{3(b)}

a, b, c, Département de génie civil, Université de Boumerdes.

* abdugc01@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Les expertises effectuées sur des structures de bâtiments en béton armé endommagées par le séisme de Boumerdes 2003 ont révélé que l'une des causes principales de l'ampleur des dégâts enregistrés est due à la qualité du béton mis en place. La technologie et les conditions de mise en place des bétons sur chantier ne reflètent pas la réalité des essais de laboratoires. Les techniques de contrôles classiques ne permettent pas de détecter les imperfections sur la qualité de résistance du béton coulé sur place.

L'évaluation de la vulnérabilité sismique des constructions existantes en béton armé situées dans le nord Algérien, classé zone de forte sismique par le dernier règlement parasismique Algérien, nécessite la connaissance des caractéristiques mécaniques des matériaux mis en place. La résistance du béton à la compression, indicateur principal à introduire dans les modèles de calcul pour évaluer le comportement sismique d'une structure existante nécessite de pallier une grande surface de béton dans des zones critiques, difficilement accessibles par les techniques classiques basées sur des essais destructifs.

La mesure non destructive de la résistance du béton *in-situ* par ultra son est une alternative intéressante pour

mieux contrôler la qualité du béton mis en place des nouvelles constructions (moyen dissuasif) et appréhender la vulnérabilité sismique des structures existantes.

Les résultats de mesures de la vitesse ultra sonore dans le béton sont corrélés avec des mesures de références sur éprouvettes en état et en absence de tout chargement. Lors des mesures *in-situ*, le béton est soumis à des chargements provoquant des contraintes mécaniques de nature et de taux variés. Ces contraintes modifient la microstructure du béton et peut influer sur les informations transmises par les mesures ultrasonores.

La présente communication a pour but de mesurer expérimentalement l'influence des taux de chargement axial (compression) sur la variation de la vitesse ultrasonores dans le béton. « Schéma représentatif des éléments verticaux de résistance (poteaux et voiles) des structures de bâtiments en béton armé dans les conditions normales d'exploitation ».

ABSTRACT

Expertise carried out on buildings structures of reinforced concrete damaged by the earthquake of Boumerdes in 2003



showed up that the main causes of the damage recorded is due to the quality of the concrete set up. The Technology and the conditions of installation of concrete on building site do not reflect the reality of laboratory tests, however, traditional techniques of control don't make it possible to detect the imperfections on the stress quality of the concrete set up.

The estimation of the seismic vulnerability of existing reinforced concrete construction situated in north Algerian, classified as a zone of strong seismic by the last regulation Algerian earthquake, requires the knowledge of the mechanical properties of materials set up. The strength of concrete to compression, principal indicator to introduce into the models of calculation to evaluate the seismic behavior of an existing structure requires mitigate a large surface of concrete in critical zones, difficult to reach by conventional techniques based on destructive tests.

Non-destructive measurements of the concrete strength on the spot by ultrasound is an interesting alternative for better controlling the quality of concrete set up of new constructions (dissuasive means) and understand the seismic vulnerability of existing structures.

The results of measurement ultrasonic velocity in the concrete are correlated with measurements of references on test-tube in state and absence of any loading. During on the spot measurements, the concrete is subjected to loading causing of the mechanical stresses of nature and from rate vary. These stresses modify the microstructure of concrete and can affect the information transmitted by the measurements ultrasonic.

the purpose of the present communication is to measure in experiments the influence of the rate of axial loading (compression) on the variation of the ultrasonic velocity in concrete. «diagram representative of the vertical elements of strength (columns and wall) of the structures of reinforced concrete buildings under normal conditions of operating.»

Mots-clés : Caractérisation du béton, Vitesse ultrasonore, Contrainte axiale de compression.

* * *

1. INTRODUCTION

La propagation des ondes ultrasonores est liée directement aux propriétés mécaniques des matériaux. La vitesse de phase permet de remonter à la masse volumique et les modules de compression et de cisaillement, tandis que l'atténuation est liée aux micros et macros fissurations, ainsi que le degré d'hétérogénéité du matériau. Ces dernières sont directement liées à la formulation du béton [1].

La diversité des bétons actuels, aux propriétés extrêmement variables, ne permet pas d'imaginer un principe de formulation commun. Généralement, la formulation sera orientée vers les propriétés principales demandées au matériau (résistance, ouvrabilité) et adaptée en fonction des propriétés secondaires recherchées (perméabilité, durabilité). Une formule donne un béton qui présente au mieux

des propriétés désirées et qui satisfasse aux essais de convenance pour tel ouvrage sur tel chantier, avec ses matériaux et son matériel mais aussi dans les conditions pratiques de l'exécution.

Pour la formulation de notre béton nous avons utilisé la méthode de Dreux-Gorisso [2]. Cette formulation nous a permis d'obtenir un béton de résistance à la compression de 26MPa,

La partie expérimentale consiste à tester l'influence du taux de chargement axial sur la vitesse de propagation des ondes ultrasonores sur un béton de caractéristiques mécaniques déterminées.

La vitesse ultrasonore est mesurée à vide et sous des taux de chargement allant de (0 à 80) % de la résistance maximale obtenue par l'essai destructif à la presse.

2. MESURE DE LA VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES ULTRASONOORES

On produit un train d'impulsion de vibration au moyen d'un émetteur appliqué sur l'une des faces de l'élément à contrôler. Après avoir franchi une longueur de parcours (L) dans le béton, l'impulsion de vibration est convertie en un signal électrique à l'aide d'un récepteur et la base de temps électronique permet de mesurer le temps de propagation des ondes ultrasonores (T). La vitesse de propagation des ultrasons est donnée par la formule [3], [4]: $V=L/T$. (1)

2.1. Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores

Bien que la direction pour laquelle le maximum d'énergie propage par rapport à la face d'émission, il est possible de détecter des impulsions qui se propagent dans le béton en d'autres directions. Il est possible donc de faire des mesures de vitesse de propagation en plaçant les deux transducteurs en position (transmission directe), adjacents (transmission semi directe) ou sur le même plan (transmission indirecte ou de surface) figure 1.

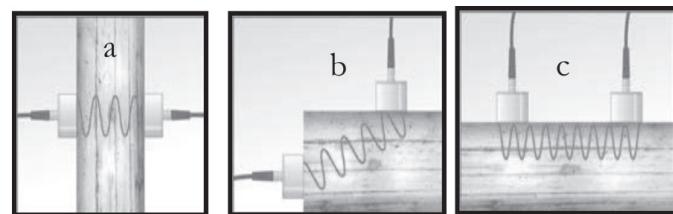


Figure 1 : (a) Transmission directe, (b) Transmission semi - directe, (c) Transmission indirecte ou de surface

2.2. Mesures ultrasonores

Les mesures des vitesses des ultrasons ont été réalisées en mode de transmission directe, ce mode fournit le maximum d'énergie. Elle est réalisée par un testeur ultrasonique 58-E0048 (marque Controls), (figure 3), comprenant un



transducteur de transmission et un transducteur de réception de 54 kHz de fréquence. Un type de transducteur de diamètre D=49.5 mm a été utilisé. Les transducteurs sont mis en contact sur les faces des éprouvettes par l'intermédiaire d'un couplant (figure 2). Le temps de propagation à travers le béton est visualisé sur un afficheur digital.

La longueur du parcours est de 320 mm et la dimension transversale est de 160 mm. Les vitesses des ultrasons ont été déterminées par des mesures du temps de parcours sur une série de trois éprouvettes ; pour chaque éprouvette on prend 5 points mesurés par essais (figure 4). Les éprouvettes ont séjournées dans une température ambiante de 20°C.



Figure 2 : Positions des transducteurs



Figure 3 : Testeur à ultrasons



Figure 4 : Positionnement des points des mesures ultrasonores

2.3. Mélange du béton analysé

Les essais ont été réalisé sur un béton de résistance moyenne à la compression $f_{c28} = 26 \text{ MPa}$. Les différentes fractions de granulats sont présentées dans le tableau ci-après.

3. VITESSE DE PROPAGATION ULTRASONORE EN FONCTION DU CHARGEMENT

La caractérisation non destructive des structures en béton se fait par l'étalonnage des éprouvettes à 28 jours à contrainte nulle, cette procédure présente des anomalies et ne reflète pas la réalité du béton dans les ouvrages. Les essais non destructifs sont réalisés sur des structures mises en service. Durant la réalisation et dans les conditions d'exploitation, le béton se trouve sous chargements, ces derniers développent dans le béton des contraintes de différentes natures (normale et de cisaillement).

En fonction de la nature et de taux de contraintes, la microstructure du béton peut changer, et des microfissures

| | | Dosage | |
|-------------------------------|-----------|---------------|---------------|
| Les constituants | | En volume [l] | En masse [Kg] |
| Ciment (ACC)CPJ 42.5 [MPa] | | 120 | 375 |
| Eau | | 158 | 158 |
| sable | Baghlia | 210 | 558.6 |
| | Boussaâda | 70 | 184 |
| | Sable fin | | |
| Gravier 3/8 | | 175 | 469 |
| Gravier 8/15 | | 245 | 654.15 |

Tableau 1 : Dosage des différents constituants

apparaissent à partir de certain taux de chargement, ces derniers peuvent perturber la vitesse ultrasonore mesurée. L'objectif de l'expérimentation est de mesurer l'influence du taux chargement axial sur la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le béton.

3.1. Dispositif expérimental

Pour des considérations liées aux conditions d'expérimentation. La vitesse d'impulsion a été mesurée dans la direction perpendiculaire au chargement. Cela reflète la meilleure possibilité de mesure pour des éléments verticaux des structures (poteaux et voiles).

Pour l'application de la charge axiale nous avons utilisé la presse à béton de 2000 KN.

La vitesse ultrasonore a été mesurée par un appareil ultrasonore 58-E0048.

Les mesures sont réalisées au contact par des transducteurs ultrasonores de basse fréquence 54 kHz. Les transducteurs sont maintenus sur l'éprouvette par des pièces mécaniques servant également à la mise en position de l'ensemble sur la presse (Figure 5).

Pour éviter l'effet de confinement sur les transducteurs, une plaque de polystyrène a été placée entre les transducteurs et la plaque de fixation. Cela nous permet d'éviter des contraintes sur les transducteurs provoquées par la déformation latérale due aux chargements axiaux de l'éprouvette.

3.2. Procédure de mesure

Les charges sont appliquées progressivement. Pour chaque état de chargement nous avons mesuré la vitesse ultrasonore correspondante. Les mesures ont été effectuées sur trois (03) éprouvettes cylindriques (16-32) cm de résistance moyenne de 26 MPa (Figures 5, 6) [5].

3.3. Variation des vitesses ultrasonores en fonction de chargement

Avec l'augmentation des contraintes dans le béton, l'état de la structure initiale subit des modifications. Afin de



Figure 5 : Disposition expérimentale

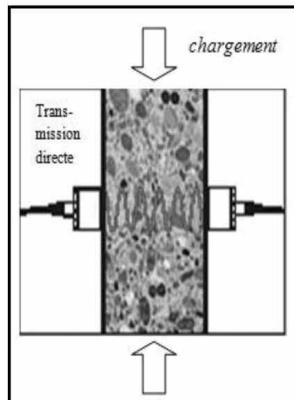


Figure 6 : Positions des transducteurs

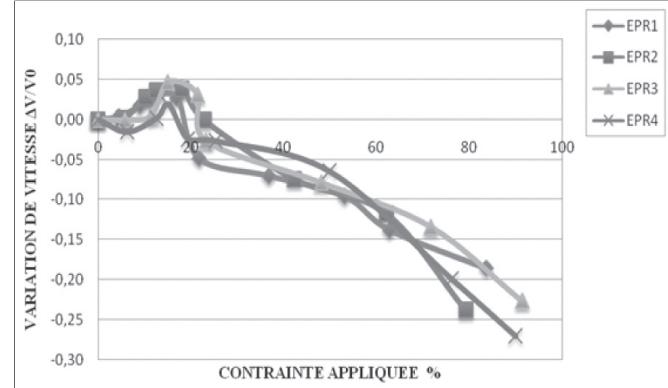


Figure 7 : Relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonores longitudinale et la contrainte appliquée.

On constate que dans l'intervalle de chargement de :

- [0,5)% de la résistance à la compression, nous remarquons que la variation de la vitesse est de : $\Delta V / V_0 \approx 0.00$ m/s. Dans cet intervalle, l'effet du taux de chargement est négligeable, pour cela le facteur correcteur est égal à 1 ; $V_0 \approx 1 \times V$ (4).
- [5,15)% de la résistance à la compression, on constate une augmentation de la variation de la vitesse $\Delta V / V_0 \approx [0.02, 0.04]$, la présence des contraintes augmente la vitesse ultrasonore, la vitesse mesurée doit être multiplier par le facteur correcteur F_{corr} pour obtenir la vitesse V_0 à vide :
 $V_0 \approx [0.96, 0.98] \times V$ (5).
- [15,20)% de la résistance à la compression, $\Delta V / V_0 \approx [0.05, 0.00], (V_0 \geq V_0)$
 $V_0 \approx [0.953, 1] \times V$ (6).
- [20,40)% de la résistance à la compression, $\Delta V / V_0 \approx [0.00, -0.07]$,
 $V_0 \approx [1, 1.075] \times V$ (7).
- [40,60)% de la résistance à la compression, $\Delta V / V_0 \approx [-0.07, -0.14]$,
 $V_0 \approx [1.075, 1.16] \times V$ (8).
- [60,80)% de la résistance à la compression, $\Delta V / V_0 \approx [-0.14, -0.23]$,
 $V_0 \approx [1.16, 1.3] \times V$ (9).

4. CONCLUSION

D'après les résultats obtenus, on constate que la variation de la vitesse ultrasonore dans le béton pour des chargements ne dépassant pas les 20% de la résistance à la rupture, ne dépasse pas les 5% de V_0 , elle revient à V_0 pour une contrainte de l'ordre 20% de résistance de béton à la rupture. Dans cette intervalle de chargement l'influence des contraintes sur V_0 . Pour des taux de chargements de 20 à 40 %, la variation de la vitesse V a tendance de diminuer pour atteindre 8% de V_0 . Pour passer de V mesurée à V_0 on multiple par le facteur correcteur $F_{corr}=1.08$. Pour des taux de chargements de 40 à 60 %, ce qui correspond aux conditions normales d'exploitation des ouvrages en béton armé à l'état limite de service $\bar{\sigma}_{bc} \leq 0.6f_{c28}$,

déterminer l'influence des taux de chargement sur la variation de la vitesse ultrasonore.

Nous présentons les résultats obtenus pour les variations de vitesse V dans le milieu sous contrainte par rapport à la vitesse V_0 dans le milieu en absence de contraintes, Les résultats des mesures obtenus sont présentés sur la (Figure 7) en termes de variation de vitesse en fonction des contraintes appliquées :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_{\sigma \neq 0} - V_{\sigma=0}}{V_{\sigma=0}} = f(\sigma) \quad (2)$$

Les courbes obtenues pour le béton montrent que pour des contraintes de compression allant jusqu'à 15 à 20%, on constate une augmentation de la variation de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores de l'ordre de 0,05, à cause de développement d'un milieu favorable à la propagation des ondes ultrasonores, (augmentation de la compacité, fermeture de microfissures).

Au-delà de cette limite, on remarque une diminution de la vitesse ultrasonore à cause de l'apparition des fissures qui influent systématiquement sur la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Ces résultats sont conformes aux résultats obtenus par les travaux [6,7].

L'état de contrainte dans le béton influe sur la caractérisation par ultrason. Pour tenir compte de cet effet dans l'évaluation non destructive par ultrason, nous proposons un facteur correcteur pour tenir compte de l'influence du taux de contraintes sur la vitesse ultrasonore. Ce qui nous permettons de mieux évaluer les propriétés mécaniques du béton en place. La caractérisation de la qualité du béton dans les structures consiste dans la détermination de la vitesse ultrasonore. Pour cela on ne doit disposer de la vitesse à contrainte nulle V_0 . Il est impératif de connaître la relation entre la vitesse initiale et la vitesse dans l'état de chargement. D'après la relation (2), la vitesse V_0 en fonction de V est donnée par la relation suivante :

$$V_0 = \frac{V}{\left(\frac{\Delta V}{V_0} + 1 \right)} = F_{corr} \times V \quad (3)$$

F_{corr} un facteur correcteur



la variation des vitesses V a tendance de diminuer pour atteindre 16% de V_0 . Pour passer de V mesurée à V_0 on multiple par un facteur correcteur $F_{corr} = 1,16$.

Pour des taux de chargements de l'ordre de 60 à 80 %, la structure subit un chargement dépassant les conditions normales d'exploitation.

La variation des vitesses V a tendance de diminuer pour atteindre 30% de V_0 . Pour passer de V mesurée à V_0 on multiple par le facteur correcteur $F_{corr} = 1,30$.

RÉFÉRENCES

- [1] M.Cheroun, L.LU, L.LE Marec, (2002) « Multiple scattering of ultrasonic waves for non destructive testing of concrete of using surface wave ». Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) ; Institut de Recherche Mathématiques de Rennes (IRMAR), France.
- [2] Georges DREUX, Jean FESTA, (1998), « Nouveau guide du béton et de ses constituants ». Huitième édition, pp404.

[3] Jean Berthier (2005), «Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton». Presse Nationale des ponts et chaussées. France pp555.

[4] R. F. Feidman, Publié à l'origine en octobre (1977), « CBD-187-F. Essais non destructifs du béton ».Conseil nationale de recherches Canada. (www.cnrc.gc.ca).

[5] P. Safinowski, B. Piwakowski, J-P.Balayssac, M. Goueygou, A. Kosecki, (2007), « Contrôle non destructif du béton par ultrason à laide d'un dispositif automatisé ». Groupe Electrique-Acoustique, IEMN DOAE UMR CNRS 8520, Ecole centrale de Lille; Laboratoire matériaux et durabilité des constructions (LMDC INSA-UPS).

[6] SANDOR POPOVICS, JOHN S. POPOVICS (1991) « Effect of stresses on the ultrasonic pulse velocity in concrete» Department of Civil Engineering, Drexel University, Philadelphia, PA 19104, USA.

[7] V. GARNIER, J. F. CHAIX, M. ROSSAT, C. PAYAN, G. CORNELOUP « Caractérisation Non Destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores » 19^e Congrès Français de Mécanique Marseille, 24-28 août 2009.

