



MESURE DE DÉFORMATION PAR CORDE VIBRANTE (ou témoin sonore)

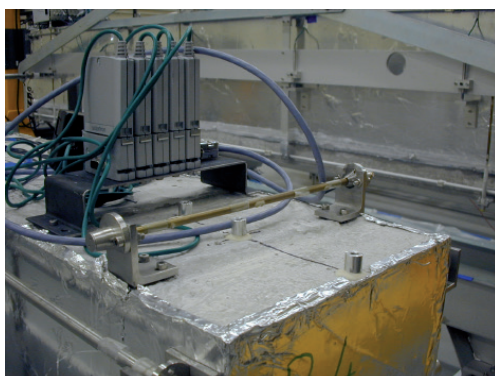
PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE

OBJECTIF	<p>Les extensomètres à corde vibrante (encore appelés témoins sonores) ont pour objectif de mesurer la déformation d'un élément d'ouvrage par la mesure de la variation de fréquence d'une corde tendue à l'intérieur du corps du capteur. La déformation est définie comme le rapport de la variation de la longueur de la corde à sa longueur initiale.</p>
PRINCIPE	<p>Les extensomètres à corde vibrante sont constitués par un tube cylindrique muni d'une tête à chaque extrémité. La corde vibrante qui coulisse librement à l'intérieur du tube est tendue et fixée aux deux têtes. Dans le cas usuel, au milieu du tube se trouvent deux électro-aimants : l'un permet l'excitation de la corde tandis que l'autre mesure la fréquence de vibration de la corde.</p> <p>Dans le cas du témoin noyé dans le béton, les têtes qui permettent l'ancrage du témoin au sein du matériau, suivent l'allongement ou le raccourcissement du béton ; il s'en suit un allongement ou un raccourcissement de la corde dont la fréquence de vibration se trouve être ainsi modifiée. La mesure de la variation de fréquence permet d'évaluer la déformation du matériau selon la formule des cordes vibrantes :</p> $F = (1 / 2L) \sqrt{(\sigma / \rho)}$ <p>Avec F : fréquence de vibration L : longueur de la corde σ : tension dans la corde ρ : masse linéique de la corde</p> <p>En pratique, on utilise la formule suivante :</p> $\Delta L / L = K (F_2^2 - F_1^2)$ <p>Où $\Delta L / L$ est la déformation recherchée entre l'état 1 et l'état 2 K est un coefficient d'étalonnage fourni par le fabricant F_1 est la fréquence mesurée à l'état 1 F_2 est la fréquence mesurée à l'état 2</p> <p>Les extensomètres à corde vibrante couramment utilisés ont un corps rigide. La fréquence initiale de vibration de la corde est alors pré-réglée en usine et sa valeur peut être spécifiée en fonction de la plage de mesure attendue.</p> <p>Dans le cas de l'extensométrie sur béton qui gonfle, il existe aussi des extensomètres à corde vibrante dont le corps est souple (présence d'un soufflet) de façon à ce que le témoin sonore n'oppose pas de résistance au gonflement du béton ; la tension de la corde doit alors être pré-réglée en prenant appui sur les parois du coffrage.</p> <p>Les extensomètres ont des longueurs variables ; pour de l'extensométrie locale sur du béton (la plus fréquemment utilisée), les longueurs des cordes sont de l'ordre de 90 à 110 mm. Pour de l'extensométrie plus globale, les cordes peuvent atteindre 3 mètres. On utilise dans ce cas un principe d'excitation répartie (réf. Larive et al.)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="496 1704 850 1944"> <p>Corde vibrante</p> </div> <div data-bbox="858 1704 1222 1944"> </div> <div data-bbox="1241 1704 1497 1944"> </div> </div> <p>Corde vibrante du type TELEMAC C110 (IFSTTAR) Corde vibrante sans raideur à excitation répartie (IFSTTAR)</p>

PRINCIPE	<p>La corde et le tube ont des coefficients de dilatation thermique proches qui sont eux-mêmes proches du coefficient de dilatation thermique du béton ; ce qui amène à dire que l'extensomètre à corde vibrante est auto-compensé en température. Mais il est évidemment préférable d'appliquer des corrections thermiques tenant compte des différences entre ces coefficients lorsque l'on souhaite pratiquer une analyse plus fine des mesures.</p> <p>De même, le coefficient d'étalonnage est fourni pour un béton standard ; dans le cas de bétons de rigidité faible ou élevée, il est conseillé d'ajuster ce coefficient qui doit tenir compte des propriétés d'inclusion du capteur dans un milieu de rigidité donnée.</p>
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Non destructif
MATURITÉ	<p>Méthode éprouvée depuis plusieurs décennies. Les Témoins sonores ont été inventés par M. Coyne dans les années 1930.</p> <p>Des témoins de cette époque installés dans des barrages fonctionnent encore de nos jours.</p>
MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	<p>Les capteurs actuels sont généralement connectés sur une centrale d'acquisition ou sur une carte électronique capable d'exciter les capteurs, de lire leur fréquence de vibration, et de les commuter.</p> <p>Ces matériels sont souvent vendus par les fournisseurs des extensomètres à corde vibrante.</p>

MODALITÉS D'APPLICATIONS

Si ces capteurs sont utilisés majoritairement à l'intérieur du béton, ils peuvent également être utilisés en mesure externe. Dans ce dernier cas ils doivent être fixés solidement (généralement à l'aide de cornières) par leurs têtes sur le parement de structures en béton et de structures métalliques (le soudage est souvent interdit et il convient d'utiliser des boulons ou éventuellement de la colle, etc.).



Capteur sans raideur fixé en extérieur (IFSTTAR)

Il est possible de répartir des cordes vibrantes sur la hauteur d'une section pour évaluer sa courbure (Diagramme de Navier)



Cordes vibrantes sans raideur à l'intérieur d'un coffrage (IFSTTAR)

DOMAINE D'APPLICATION

<p>DOMAINE D'APPLICATION</p>	<p>Ils permettent de :</p> <ul style="list-style-type: none"> – mesurer le comportement sous chargement et de surveiller les structures ; – déterminer le diagramme des déformations ; – déterminer le module de déformation d'une éprouvette de béton ou d'étudier son fluage ; – de vérifier le fonctionnement de sections critiques (sous charges contrôlées ou sous trafic) ; – de suivre d'éventuels gonflements pathologiques. <p>Ils ont pour avantage une grande stabilité dans le temps, sans nécessité de recalage, sous réserve d'avoir pris les précautions d'étanchéité nécessaires.</p> <p>Les mesures de déformation effectuées sur des structures en béton intègrent les effets différés des matériaux, et notamment le retrait et le fluage. Il est possible de déduire le retrait en plaçant un témoin sonore dans le béton de la structure et en prenant soin de l'isoler mécaniquement (à l'aide d'une boîte) du reste de la structure ; c'est ce que l'on appelle un témoin de retrait. On fait alors l'hypothèse implicite que les deux capteurs sont soumis aux mêmes conditions hydriques.</p>  <p>Exemple de témoin de retrait avant incorporation dans la structure au moment du bétonnage (IFSTTAR)</p> <p>Les capteurs à corde vibrante peuvent également donner une mesure de la température (via leurs bobines), mais celle-ci est généralement moins précise que celle donnée par une sonde de température.</p>
<p>SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION</p>	<p>La fixation des témoins sonores à l'intérieur des coffrages doit être bien faite de façon à éviter que les témoins bougent lors du bétonnage. Il est conseillé de les fixer au ferrailage à l'aide de 4 fils de fer (2 en V à chaque extrémité) bien tendus. Il faut aussi être excessivement vigilant au moment de la vibration du béton et empêcher que l'aiguille vibrante n'aille trop près du témoin sonore. Il faut absolument éviter tout contact avec l'aiguille vibrante.</p> <p>Lorsque la corde vibrante est fixée à l'extérieur d'une structure, Il faut alors prendre garde au risque de flexion parasite du capteur provoquée par la rigidité des ancrages, au risque de bridage par les fixations du capteur, ainsi qu'à l'influence des déformations transversales du support qui peuvent fausser les mesures de déformations longitudinales.</p>
<p>LIMITES D'UTILISATION</p>	<p>Gamme de déformations comprise entre 0 et $2 \cdot 10^{-3}$.</p> <p>Le temps de réponse et de stabilisation des capteurs et le temps de traitement (de l'ordre de la minute) rendent ces capteurs inadaptés pour les mesures d'effets de charges rapidement variables comme le trafic.</p> <p>Dans le cas de cordes vibrantes incorporant des aimants, il convient de ne pas les exposer à des températures dépassant environ 60°C.</p>
<p>PRÉCISION ET/OU SENSIBILITÉ</p>	<p>De l'ordre du $\mu\text{m/m}$</p>
<p>PERSONNEL ET COMPÉTENCES</p>	<p>Chargé d'investigation. L'équipe d'intervention est constituée de personnel ayant reçu une formation sur l'instrumentation des ouvrages d'art.</p>
CARACTÉRISTIQUES OPÉRATOIRES	
<p>ACCÈS À 1 OU 2 FACES</p>	<p>Dépend du type d'ouvrage</p>
<p>COUPURES OU RESTRICTIONS DE CIRCULATION NÉCESSAIRES</p>	<p>Non</p>
<p>RENDEMENT ET/OU ÉCHANTILLONNAGE</p>	<p>Dépend du nombre de voies d'acquisition de la centrale d'acquisition.</p>
<p>DÉLAIS DE DISPONIBILITÉ DES RÉSULTATS</p>	<p>De l'ordre de quelques minutes (pour avoir un signal stabilisé) sur l'écran de l'ordinateur portable relié à la centrale d'acquisition, ou sur l'écran d'un poste à lecture manuelle.</p>

PERTURBATIONS DU TRAFIC SUR LES MESURES	Oui
PERTURBATIONS DE L'ENVIRONNEMENT SUR LES MESURES	Il faut tenir compte des corrections thermiques et éviter les charges variables (par exemple le vent).
RISQUES POUR LES UTILISATEURS OU LE PUBLIC	Aucune précaution particulière
ENCOMBREMENT – POIDS	Dépend essentiellement du câblage et de la centrale. Le capteur lui-même représente une inclusion de diamètre centimétrique, pour une longueur généralement de l'ordre de 10 cm. Poids du capteur très faible.

AVANTAGES – INCONVÉNIENTS

AVANTAGES	Capteur précis, « rustique » et fiable sur le long terme. Peut fonctionner pendant plusieurs dizaines d'années (actuellement plus d'un demi-siècle). Visualisation en temps réel avec un ordinateur portable.
INCONVÉNIENTS	Peu adaptés pour les mesures en dynamique rapide. Certains témoins peuvent « mourir » prématurément (ceci est vraisemblablement dû à un problème de fabrication : les aspects critiques étant l'étanchéité, le traitement du fil et son bon ancrage). Taille trop importante pour mesurer des contraintes très locales dans des structures métalliques (longueur de base minimale de l'ordre de 80 mm).

DISPONIBILITÉ – COÛT

DISPONIBILITÉ	Courante (il existe plusieurs fabricants)
COÛT	Élevé (amortissement de la centrale et coût de la main d'œuvre)

RÉFÉRENCES

NORMES – MODES OPÉRATOIRES – ARTICLES	Larive C., Joly M., Dubois J.P., Choquet P. (1995) – Theoretical and experimental validation of the vibrating-wire principle. Application to a low stiffness strainmeter for embedment in concrete. Proceedings of the 4 th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics. Bergamo, Italy, April 10-12, pp. 341-348. Néron P., Léveillé A., Lenoir B., Tonnoir B., Godart B. – Viaduc d'Amiens : conception et réalisation de l'ouvrage, suivi expérimental sur site pendant la construction - Annales de l'ITBTP N°473, mars-avril 1989, pp 1-56.
---------------------------------------	--