Mesure du retrait au coeur d'un béton avec un capteur de déformation 3D

Yann Lecieux[1] , Emmanuel Rozière[2] , Cyril Lupi[1] , Dominique Leduc[1] , Marc L. M. François[1]

[1] *Laboratoire GeM (UMR 6183), Université de Nantes, 2, rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 3 (France) yann.lecieux@univ-nantes.fr*

[2] *Laboratoire GeM (UMR 6183), École Centrale Nantes, 1 Rue de la Noë, 44300 Nantes (France)*

RÉSUMÉ. *Un capteur 3D basé sur le modèle d'Eshelby et récemment décrit dans [FRA 17] a été coulé dans une éprouvette en béton pour mesurer les déformations en son cœur. Le dispositif de mesure est constitué de capteurs unidirectionnels à réseaux de Bragg assemblés au sein d'un corps d'épreuve métallique de forme sphérique. Il a été utilisé pour mesurer le retrait endogène et de dessiccation du matériau ainsi que lors d'un test de compression. Cet essai a permis d'évaluer les performances du capteur 3D par comparaison avec les déformations fournies par des jauges de déformations résistives collées à la surface d'une éprouvette. Les résultats de suivi du retrait ont montré une influence significative de la température sur l'évolution de la contrainte, en accord avec les connaissances existantes sur les phénomènes de fissuration au jeune âge. Pendant le séchage, les mesures fournies par les capteurs LVDT externes et le capteur 3D interne étaient en accord à part lors des premiers jours. En conséquence, ce nouveau capteur 3D peut être utilisé pour mesurer des profils de déformation en laboratoire ou pour la surveillance in-situ à long terme du comportement des matériaux ou des structures.*

ABSTRACT. *A 3D sensor based on the Eshelby's model and recently described in [FRA 17] was poured into a concrete specimen to measure the strain within material. The measuring device consists of unidirectional Bragg gratings sensors assembled within a steel sphere. It was used to monitor concrete shrinkage within concrete in sealed then drying conditions as well as during a compression test. This test made it possible to assess the performance of the 3D sensor by comparison with the strains provided by resistive deformation gages glued on the surface of a specimen. The results of shrinkage monitoring showed a significant influence of temperature on the strain evolution and were consistent with existing knowledge on early-age cracking phenomena. In drying conditions measurements provided by external LVDT sensors and internal 3D sensor were in good agreement except for the first days. As a consequence the new 3D sensor can be used to investigate stress or strain profiles at laboratory scale as well as to monitor the long-term behavior of structural materials.*

MOTS-CLÉS : *Capteur noyé, Réseaux de Bragg, Eshelby, Retrait, SHM, Béton*

KEYWORDS: *Embedded Sensors, Braggs gratings, Eshelby, Shrinkage, SHM, Concrete*

1. Introduction

Le contrôle de santé des structures ou Structural Health Monitoring (SHM) vise la détermination des paramètres physiques d'un ouvrage à partir de capteurs répartis en des points critiques de la structure. La chaine de mesure a souvent pour objectif de surveiller les déformations de la structure d'étude. De nombreuses technologies ont été développées en ce sens et la plupart d'entre-elles sont maintenant disponibles commercialement. On peut citer en exemple les cordes vibrantes, les jauges de déformations résistives, ou les capteurs à fibre optique à réseaux de Bragg. Ces composants sont des capteurs unidirectionnel susceptibles pour certain d'être noyés à cœur du béton. Ils peuvent également être collés sur une paroi de la structure et associés sous forme de rosettes, pour la mesure du champ de déformation sur la surface, qui est généralement l'emplacement pour lequel les contraintes sont les plus élevées. Dans certains cas toutefois, cette information n'est pas suffisante. Le retrait est un exemple. Il est susceptible d'induire un état de déformation 3D et des profils de contraintes complexes, d'où la nécessité d'utiliser un capteur multidirectionnel noyé dans la structure. En effet, il s'avère généralement difficile d'évaluer la contrainte résiduelle réelle à un point donné et dans une direction particulière à partir d'une information parcellaire. Le capteur de contrainte 3D développé par [FRA 17] permet la mesure de l'ensemble des composantes du tenseur de déformation à cœur de la structure. Il est basé sur la théorie d'Eshelby [Esh 57] qui propose un cadre théorique complet permettant d'évaluer les déformations du béton à partir des déformations mesurées par les capteurs unidirectionnels assemblés au sein d'un corps d'épreuve métallique. La forme sphérique de ce dernier induit une concentration de contrainte minimale dans la matrice et la relation analytique d'Eshelby permet de retrouver l'état de contrainte (ou de déformation) qui existerait dans la matrice en l'absence du capteur. La méthode est appropriée à l'étude des déformations liées à l'évolution du béton, notamment le retrait endogène (y compris les effets de la température) et le séchage. L'étude expérimentale présentée ici vise à observer le retrait d'un béton haute performance à l'aide d'un capteur 3D sphérique noyé dans une éprouvette cylindrique lors de sa fabrication. L'analyse des composantes du tenseur de déformation mesurées au sein du capteur 3D associé à la mesure des propriétés élastiques du béton permettent de calculer les déformations axiales et radiales dans l'éprouvette lors des essais de compression et pendant le suivi du retrait. Ces déformations sont corrélées avec l'évolution de la température et des propriétés du béton puis comparées à des mesures externes.

2. Application du modèle d'inclusion d'Eshelby à la mesure de déformation

Les travaux d'Eshelby [Esh 57] concernent le problème d'une inclusion élastique ellipsoïdale placée à l'intérieur d'une matrice infinie homogène chargée uniformément à l'infini. Cette théorie s'applique à la mesure de déformation si l'on considère la forme sphérique du capteur (l'inclusion) et que l'on suppose que l'échantillon (la matrice) est suffisamment grand par rapport au capteur (voir figure ref fig :1 a). Eshelby démontre que la déformation à l'intérieur de l'inclusion $\mathbf{E}$ est homogène et liée à la déformation de la matrice à l'infini $\mathbf{E}_0$ comme suit [FRA 17] :

$$\left(\mathbb{I} + \mathbb{S}_0 : \mathbb{C}_0^{-1} : (\mathbb{C} - \mathbb{C}_0)\right) : \mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbb{S}_0 : \mathbb{C}_0^{-1} : (\mathbb{C} : \mathbf{E}^f - \mathbb{C}_0 : \mathbf{E}_0^f) \tag{1}$$

où $\mathbf{E}^f$ et $\mathbf{E}_0^f$ désignent la déformation libre (déformation sans contrainte) de l'inclusion et de la matrice, $\mathbb{C}$ et $\mathbb{C}_0$ sont les tenseurs de Hooke, $\mathbb{I}$ le tenseur d'identité du quatrième ordre, " :" désigne le produit doublement contracté et $\mathbb{S}_0$ le tenseur d'Eshelby, soit :

$$\mathbb{C} = 3K\mathbb{P}^H + 2\mu\mathbb{P}^D \ , \ \mathbb{C}_0 = 3K_0\mathbb{P}^H + 2\mu_0\mathbb{P}^D \ , \ \mathbb{S}_0 = \frac{3K_0}{3K_0 + 4\mu_0}\mathbb{P}^H + \frac{6}{5}\frac{K_0 + 2\mu_0}{3K_0 + 4\mu_0}\mathbb{P}^D \tag{2}$$

K_0, μ_0, K, μ désignent respectivement les modules de compressibilité et de cisaillement de la matrice et de l'inclusion. $\mathbb{P}^H$ et $\mathbb{P}^D$ sont respectivement les projecteurs hydrostatiques et déviatoriques calculés par :

$$\mathbb{P}^H = \mathbf{I} \otimes \mathbf{I} \ , \ \mathbb{P}^D = \mathbb{I} - \mathbb{P}^H \tag{3}$$

Les déformations libres dans le béton, sont dues à la fois à la dilatation thermique et aux effets de retrait que l'on cherche à mesurer. Pour les cas tests considérés, on suppose que le tenseur de déformation ($\mathbf{E}_0$ pour la compression et $\mathbf{E}_0^f$ lors du retrait) est isotrope transverse. Si l'on définit $\vec{e_3}$ comme étant l'axe de l'échantillon cylindrique, le tenseur de déformation dans le béton $\mathbf{E}_0$ et le tenseur des déformations libres $\mathbf{E}_0$ s'écrivent :

$$\mathbf{E}_0^f = \begin{bmatrix} \alpha_0\Delta T + s_r(t) & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_0\Delta T + s_r(t) & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_0\Delta T + s_a(t) \end{bmatrix} \ , \ \mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} e_{r0} & 0 & 0 \\ 0 & e_{r0} & 0 \\ 0 & 0 & e_{a0} \end{bmatrix} \tag{4}$$

où (α, α_0) sont les coefficients de dilatation thermique de l'inclusion et de la matrice, $\Delta T(t)$ est la variation de température et $s_r(t), s_a(t)$ sont les fonctions de retrait que l'on cherche à déterminer. La détermination des composantes du tenseur de déformations ne nécessite qu'une mesure axiale et une mesure radiale du fait de l'isotropie transverse. Ainsi, seulement deux mesures de déformations sont nécessaires (soit un corps d'épreuve doté uniquement d'un réseau de Bragg axial et radial) et non six pour un cas de chargement quelconque. A partir de la relation 1, il est possible de calculer les fonctions de retrait $s_r(t), s_a(t)$ en supposant que le chargement à l'infini est nul. On peut alors écrire que la contrainte dans la matrice $\mathbf{\Sigma_0} = \mathbb{C}_0 : (\mathbf{E}_0 - \mathbf{E}_0^f)$ est nulle, soit $\mathbf{E_0} = \mathbf{E_0^f}$. Pour la compression, après une calibration du capteur, on suppose que la température est constante, soit $\mathbf{E^f} = \mathbf{E_0^f} = 0$.

3. Matériels et méthodes

3.1. *Le capteur 3D*

Le prototype utilisé dans cette étude est une sphère de 19 mm de rayon (voir 1 c). Il a été réalisé en acier en raison de la compatibilité de ce matériau avec le béton en termes de propriétés chimiques, élastiques et thermiques. Le capteur 3D comprend trois capteurs unidirectionnels : la mesure de l'état de déformation dans la sphère est effectuée avec des jauges de déformation optiques. Un capteur est utilisé pour mesurer la déformation axiale (7a sur la figure 1 b), le second est utilisé pour mesurer la déformation radiale (7b sur la figure 1 b) et le troisième est un capteur de température (7c sur la figure 1 b).

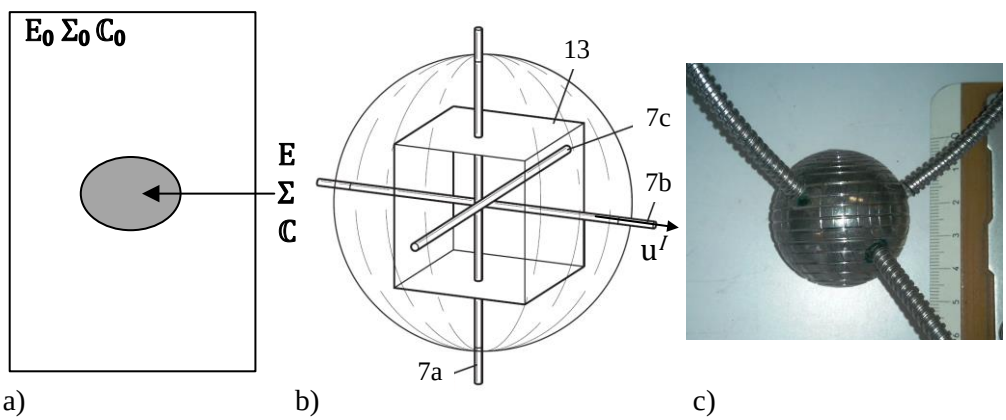

Figure 1. *a) Inclusion dans un milieu homogène élastique, b) Schéma de principe du capteur 3D, c) Prototype en acier*

3.2. *Protocole d'essais*

Deux éprouvettes cylindriques ont été testées lors des essais de retrait (16 × 32 cm). Une éprouvette a été instrumentée avec le capteur 3D, tandis que la seconde était un spécimen de contrôle sans capteur noyé à l'intérieur. Six éprouvettes cylindriques (11 × 22 cm) ont été dédiées au suivi des propriétés mécaniques du béton (module de Young, coefficient de Poisson et résistance à la compression) car elles sont nécessaires au calcul des champs de contrainte et de déformation dans la matrice avec le modèle d'Eshelby (voir équation 1). Le suivi des déformations avec le capteur 3D a débuté 30 minutes après la coulée. 24 heures après la coulée, les deux échantillons 16×32 ont été placés sur un banc de retrait dans une pièce maintenue à 20°C. La déformation axiale des deux échantillons a été enregistrée en continu par des capteurs LVDT. Les éprouvettes ont été conservées scellés pendant les 7 premiers jours. Ensuite, elles ont été mises à sécher dans la même pièce à 20°C et 50 % d'humidité relative. Après 28 jours, les deux échantillons ont été testés en compression afin d'évaluer les performances du capteur 3D pour la mesure de la déformation à cœur du béton. L'éprouvette instrumentée était à cette fin équipée de jauges de déformation résistives collées sur sa surface dans les directions axiale et tangentielle.

4. Résultats et discussion

L'éprouvette contenant le capteur 3D a été testée en compression uniaxiale à une vitesse de chargement de 5 kN.s^{-1} jusqu'à ce que 25 % de la charge de rupture soit atteinte et ce trois fois de suite. La figure 2 a) permet de comparer la déformation axiale et radiale du béton fournie par les jauges externes et le capteur 3D interne. On remarque la bonne répétabilité de la réponse du capteur 3D sans déformations résiduelles observables après les 3 cycles de chargement. L'erreur moyenne entre les mesures de déformation internes et externes est approximativement de 5×10^{-6}. La mesure fournie par le capteur 3D est jugée suffisamment fiable pour étudier le retrait.

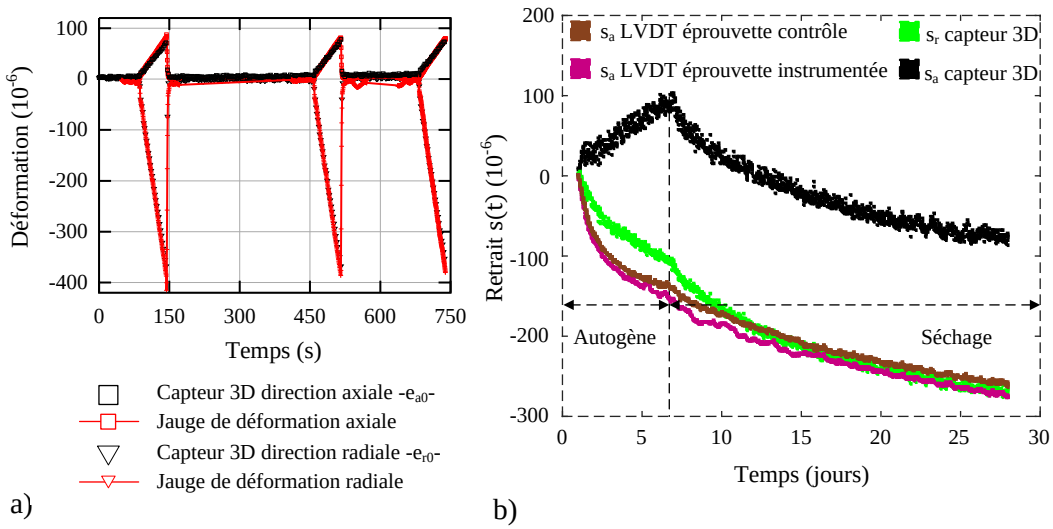

Figure 2. *a) Mesure de déformation lors d'un test de compression, b) Suivi du retrait à coeur d'une éprouvette en béton*

Les déformations mesurées par les LVDT et par le capteur 3D sont tracées sur la figure 2 b). Les mesures externes diffèrent des mesures internes lors des premiers jours, de même que les déformations axiales et radiales relevées par le capteur 3D. Plusieurs phénomènes pourraient l'expliquer. Les gradients thermiques et d'humidité relative induisent des profils de contraintes complexes et variables. Dans [PEI 14], les auteurs ont observés des phénomènes similaires lors du suivi du retrait d'un mortier avec des capteurs de déformation (FBG) positionnés à différents emplacements le long de l'axe vertical d'une éprouvette cylindrique. On remarque également que 10 jours après la fabrication du béton, tous les capteurs décrivent une évolution similaire de la déformation du béton.

5. Conclusion

Les résultats du test de compression et du suivi du retrait accréditent un bon fonctionnement du capteur 3D. Ils laissent également à supposer que cette technologie serait utile à l'amélioration de la compréhension du phénomène complexe qu'est le retrait ainsi que pour la surveillance à long terme des structures.

Remerciements

Ce travail a été financé par la SATT Ouest Valorisation et la Région Pays de la Loire à travers le projet SMOG.

6. Bibliographie

[Esh 57] ESHELBY J. D., « The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems », *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, vol. 241, p. 376-396, août 1957.

[FRA 17] FRANÇOIS M., LECIEUX Y., LEDUC D., LUPI C., ROZIÈRE E., « An Embedded 3D Strain Tensor Sensor Based on the Eshelby's Inclusion », *Experimental Mechanics*, vol. 57, n° 5, p. 801–811, Jun 2017.

[PEI 14] PEI H., LI Z., ZHANG B., MA H., « Multipoint measurement of early age shrinkage in low w/c ratio mortars by using fiber Bragg gratings », *Materials Letters*, vol. 131, n° Complete, p. 370-372, 2014.