

# Diagnostic structurel par corrélation d'images : analyse de contraintes in-situ

**ALLAIN M.<sup>1,2</sup>, PLE O.<sup>2</sup>, PRIME N.<sup>2</sup>, ROUX E.<sup>3</sup>, VACHER P.<sup>3</sup>.**

<sup>1</sup>Léon Grosse, 10 Boulevard de Russie, 73100, Aix Les Bains, France

<sup>2</sup> Université Savoie Mont Blanc, CNRS, LOCIE, 73000, Chambéry, France

<sup>3</sup> Université Savoie Mont Blanc, SYMME, 74000 Annecy, France

**RESUME** Suite aux drames les plus récents autour d'infrastructures en béton armé comme le pont de Gênes en Italie en 2018, un sentiment d'insécurité pour les usagers et les élus locaux vis-à-vis d'infrastructures en béton armé (ouvrage et bâtiment) a émergé. Ces ouvrages sont vieillissants et il est nécessaire de surveiller leur état de santé. Dans ce contexte, les autorités sont obligées de mettre en œuvre des moyens de surveillance et de contrôle, notamment pour déterminer l'état de contraintes de ces infrastructures. C'est dans ce contexte que se situe notre travail. La présente contribution décrit une technique, basée sur une libération locale de contraintes. Le défi technique et scientifique à relever réside dans l'utilisation de la corrélation d'images numériques pour approcher des micro-déplacements dans les structures. Par la suite, cette technique est utilisée pour déterminer certains paramètres mécaniques du béton.

**Mots-clefs** Diagnostic, contraintes, CIN, champ de déplacement, module d'Young

## I. INTRODUCTION

L'état de contrainte d'un élément structurel permet de savoir si l'élément en question est sollicité correctement et s'il répond toujours aux exigences des normes [1]. La recherche de cet état peut être réalisée sur des ouvrages neufs, pour s'assurer que la mise en œuvre a été réalisée correctement par exemple, mais également sur des ouvrages anciens afin de vérifier si la structure a évolué dans le temps. Les calculs réglementaires classiques prédisent le comportement des ouvrages à plus ou moins long terme, ils ne font pas de diagnostic. Il est donc nécessaire de développer ces méthodes. Des procédés industriels d'analyse de contraintes dans le béton ou les roches existent déjà, on peut citer SlotStress®, InsideStress ou Doorstopper. Ils se basent sur la libération locale des contraintes et la mesure locale des déplacements à partir de capteurs à jauge de déformation ou à corde vibrante.

Nous avons développé un outil d'analyse de contrainte in situ, également basé sur le relâchement local des contraintes, l'innovation réside dans la mesure des champs de déplacement par Corrélation d'Images Numérique (noté CIN) [2]. L'objectif principal est de libérer localement les contraintes sans endommager l'ouvrage. Contrairement à certaines techniques, celle proposée est peu invasive pour les structures. L'objectif est de mesurer l'état de contrainte avec une incertitude inférieure au MPa. Cet objectif de précision est indispensable pour une mesure fiable permettant un diagnostic fin de la structure en béton. L'analyse des contraintes nécessite deux étapes clés. La première étape est la détermination du champ de déformation lors du relâchement local des contraintes. Pour cela un carottage est réalisé sur une zone visuellement saine. Le ratio

diamètre/profondeur a été calculé afin d'avoir en surface de la carotte un relâchement quasi-total des contraintes (99%). Ce carottage, peu invasif par rapport aux autres procédés, n'endommage pas la structure. De plus, l'utilisation d'une lubrification pour l'usinage, après étude en laboratoire, a montré qu'elle n'engendrait pas de déformations hydriques parasites [3]. Les déplacements sont obtenus à partir de la CIN, puis les déformations sont calculées en faisant l'hypothèse que le béton reste dans son domaine élastique, hypothèse réaliste puisque le matériau ne subit que de très petites déformations. La seconde étape consiste à déterminer le module d'Young  $E$  du béton en rechargeant la zone d'analyse initialement relaxée, en analysant le champ de déplacement et en se basant sur le principe de superposition des efforts. Cela nous permet d'avoir une information sur l'état de contraintes et de déformations du béton et donc sur son éventuelle dégradation dans le temps. A partir de la détermination des déformations et du module d'Young, les contraintes et directions principales sont calculées en utilisant la loi de Hooke et en faisant l'hypothèse que le matériau présente un comportement homogène et isotrope. Les essais présentés ici sont réalisés en laboratoire sur un élément en béton similaire à un élément de structure de type poteau de dimensions 250 mm x 150 mm de section et de 1200 mm de hauteur.

L'ensemble de ce travail a fait l'objet d'enveloppes Soleau. Deux brevets ont été déposés et par conséquent, la méthodologie de l'étude ne pourra pas être expliquée en détail dans cet article. Pour plus d'informations, en particulier en ce qui concerne le rechargement de l'étude en vue d'identifier le module de Young il faut se référer à [4] et [5].

## II. IDENTIFICATION DU CHAMP DE DEFORMATION

### A. Méthodologie

Un dispositif, composé d'une caméra SVS-VISTEK (résolution 4 096 pixels X 3 000 pixels) d'un objectif 50 mm et de son support, est positionné dans le tiers central du poteau en béton. Le choix d'utiliser une seule caméra est justifié par l'encombrement de la zone d'étude et la précision de mesure attendue. En effet, la technique de stéréo-CIN donne une incertitude de mesure en-dessus de l'incertitude souhaitée soit 0,01 pixel. Une carotteuse avec son support est également placée sur le poteau dans le tiers central, afin d'éviter les effets de bords. Un mouchetis aléatoire est appliqué sur une zone de 4 x 6 cm, celui-ci permet d'utiliser la CIN et également d'imperméabiliser la surface d'étude afin d'éviter une imprégnation d'eau lors de l'usinage. Une force de compression de 90 kN est appliquée sur le poteau grâce à un vérin électromécanique (soit une contrainte théorique verticale de 2,4 MPa). Une première série de photo est enregistrée (état contraint). Le plot en béton est ensuite carotté sur la face de largeur 250 mm à l'aide d'une couronne de forage de diamètre externe 35 mm et sur une profondeur, notée  $h$ , de 70 mm. Une seconde série de photo est enregistrée (état non contraint). La zone d'étude du champ de déplacement correspond à la face supérieure de la carotte (Figure 1). Pour une contrainte de 2,4 MPa, avec un module d'Young supposé de 35 000 MPa pour une classe de béton C40/50, la déformation verticale due au relâchement des contraintes devrait être de  $6,86 \cdot 10^{-5}$ . Pour un diamètre d'étude de largeur initiale de 2 000 pixels (correspondant à 30 mm), le déplacement maximal attendu est de 0,137 pixel (2  $\mu$ m). Les contraintes normales réelles dans les structures étant faibles, nous souhaitons approcher une précision de 1 MPa. En conséquence, la résolution de la mesure attendue par corrélation d'image est d'environ 1/100e de pixel soit 0,15  $\mu$ m. L'hypothèse d'homogénéité de la déformation nous permet d'utiliser, sur la globalité de la zone relaxée, la méthode de corrélation d'images avec une interpolation bilinéaire et une interpolation globale du champ de déplacement. Par la suite, lors du post-traitement, deux champs de déplacements parasites doivent être identifiés et soustraits au champ

de déplacement obtenu. Tout d'abord, les mouvements de corps rigide en translation et en rotation, sont supprimés s'ils existent. Ils correspondent à un mouvement relatif provenant du déplacement absolu de la caméra et/ou du déplacement absolu de la carotte. Deuxièmement, les déplacements hors-plan de la surface de la carotte causés par l'effet Poisson sont supprimés. En effet, lors du carottage, la surface perpendiculaire à l'axe de la caméra qui vient d'être relaxée subit un retrait correspondant à :

$$\Delta L_z = h \cdot \varepsilon_{zz} = h \cdot \nu \cdot \varepsilon_{xx} \quad (1)$$

La déformation complémentaire due à ce déplacement hors plan correspond à :

$$\varepsilon_{hors\ plan} = \frac{\Delta L_z}{f} \quad (2)$$

Avec :  $f$  la distance entre la focale et l'objet.

L'utilisation de cette méthode fait intervenir le coefficient de Poisson  $\nu$ . D'après la littérature, la valeur de  $\nu$  est comprise entre 0,2 et 0,3 pour un béton standard [6]. Une optimisation permet de fixer cette valeur à  $\nu = 0,25$ .

### B. Résultats

A partir de la méthode de corrélation d'images numériques, le champ de déplacements après soustraction des deux champs de déplacements parasites est analysé. La Figure 1 illustre ce champ de déplacements, dont les valeurs sont amplifiées pour observation. On distingue, sur cette dernière, une elongation de la carotte suivant l'axe  $y$  (direction du poteau) et une contraction suivant l'axe  $x$  (perpendiculairement à l'axe du poteau) lors de la relaxation des contraintes. Ce résultat traduit que le poteau est en compression.

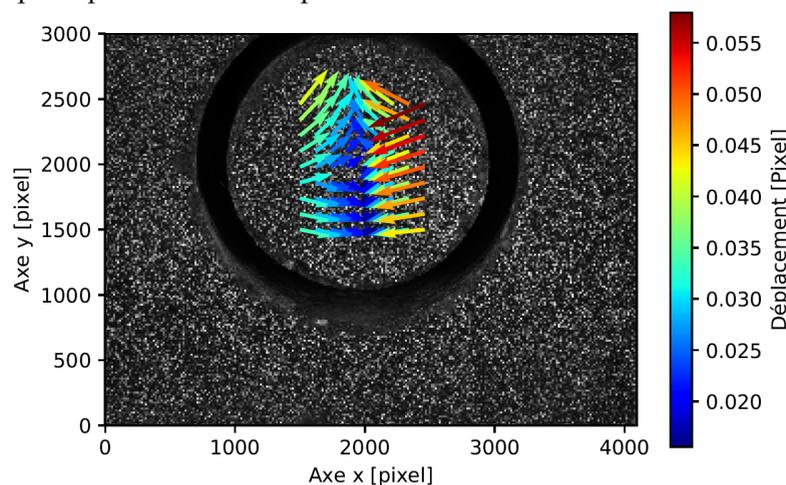


FIGURE 1. Champ de déplacements corrigé en surface de la carotte

## III. IDENTIFICATION DU MODULE D'YOUNG

A partir de notre méthodologie, nous sommes capables pour une contrainte appliquée et maîtrisée, d'obtenir les déplacements en surface du béton en fonction de la propagation de la contrainte dans la matière. Sur la Figure 2, la courbe expérimentale en trait plein noir correspond à la moyenne de la norme des déplacements dans la direction de chargement. L'enveloppe grise autour correspond à un écart type de  $\pm 1 \sigma$  de la courbe moyenne. Les outils développés ne permettent pas d'observer les déplacements justes au bord de la zone sollicitée, d'où une courbe de déplacement débutant à 3

mm de la zone d'application de l'effort. En parallèle, une modélisation numérique par éléments finis est réalisée à partir de la connaissance de l'état de contrainte dans le poteau. Plusieurs modélisations ont été réalisées pour différentes valeurs de module d'Young encadrant celle supposée pour un béton de classe C40/50. Par la suite la courbe expérimentale est comparée aux courbes théoriques et la valeur du module d'Young est estimée par une optimisation des moindres carrés. Dans cet exemple, la courbe expérimentale est proche de la courbe théorique correspondant au comportement d'un béton avec un module d'Young d'environ 35 000 MPa. Pour valider nos mesures, des échantillons cylindriques standards pour l'analyse du module d'Young ont été réalisés lors de la même coulée. Ces éprouvettes sont testées en laboratoire selon la norme NF EN 12390-3 Les essais sont menés jusqu'à la rupture dans une logique industrielle ou seul la résistance caractéristique est vérifiée. La valeur moyenne de la résistance à la rupture en compression simple est de  $f_{cm} = 46,1$  MPa avec un écart type de 2,6 MPa. A partir des recommandations de l'Eurocode 2 [1], on peut en déduire la résistance caractéristique à la compression du béton de la forme  $f_{ck} = f_{cm} - 1,645 u$  avec  $u$  l'écart type ce qui donne  $f_{ck} = 41,8$  MPa. Il s'agit donc d'un béton de classe C40/50. Le module d'Young relatif à ce béton déterminé par l'Eurocode 2 est de 35 220 MPa.

Les résultats obtenus par notre approche associée à la corrélation d'image sont en parfaite concordance avec ceux obtenus par méthode standard, validant ainsi cette technique de mesure qui peut être réalisée in-situ, sans la nécessité d'utiliser un échantillon spécifique analysé en laboratoire d'essais.

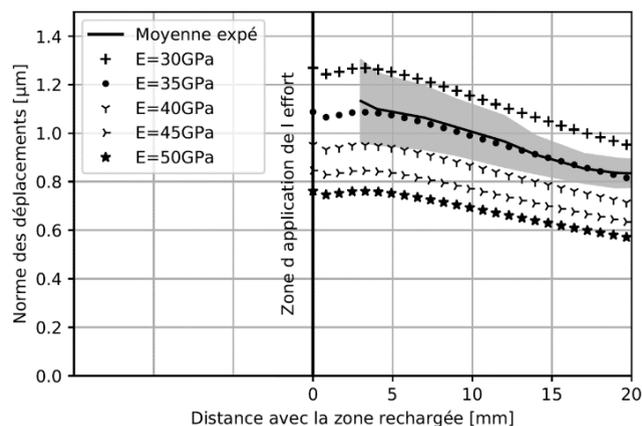


FIGURE 2. Graphique superposant la courbe expérimentale et les courbes théoriques

#### IV. IDENTIFICATION DE L'ETAT DE CONTRAINTE

A partir des mesures de déformations réalisées à la surface de la carotte et de la connaissance du module d'Young, les contraintes et directions principales sont calculées telles que  $\sigma_1 = 2,37$  MPa,  $\sigma_2 = -1,91 \cdot 10^{-3}$  MPa et  $\theta = -16,85^\circ$  de la direction de l'axe du poteau. La méthode de mesure identifie une compression verticale (suivant l'axe y) de 2,37 MPa pour une contrainte appliquée en tête de poteau de 2,4 MPa. Rappelons que notre objectif est l'identification des contraintes normales à 1 MPa près. Dans cet exemple, cet objectif est atteint.

#### V. CONCLUSION

L'originalité de cette méthode est l'identification in-situ du module d'Young et surtout l'état de contrainte dans une structure en béton à partir de technique de corrélation d'images numériques.

A partir d'un test en laboratoire reproduisant des conditions de chargement en compression, nous montrons que l'on peut déterminer une contrainte avec une précision inférieure à 1 MPa, avec des sources d'erreur identifiées [3]. La direction principale non parfaitement dans l'axe du poteau révèle de la difficulté d'appliquer un effort de compression parfaitement centré. Pour conclure, les premiers essais en laboratoire sur un élément de structure de type poteau sont concluants. La prochaine étape consistera à réaliser un test sur un ouvrage réel en site occupé en prenant en compte les conditions environnementales et les éventuels effets des armatures du béton armé. Par la suite, cette technique, couplée avec d'autres méthodes d'identification développées dans notre laboratoire, permettra d'identifier les zones à risque où il peut y avoir des concentrations de contraintes menant à la rupture.

## REFERENCES

1. EN 1992-1-2 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].
2. Vacher P., Dumoulin S., Morestin F., Mguil-Touchal S., "Bidimensional strain measurement using digital images.", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, vols 203-2010, 1989-1996
3. M. Allain, Analyse des contraintes in situ dans les structures en béton armé, thèse soutenue en janvier 2021.
4. M. Allain, N. Prime, O. Plé, P. Vacher, E. Roux, F. Pellier. 2019 : Procédé de détermination in situ des contraintes subies par une partie d'un ouvrage en béton, Dépôt Brevet N° 34113 FR - FR 2102951.
5. M. Allain, N. Prime, O. Plé, P. Vacher, E. Roux, F. Pellier. 2019 : Procédé de détermination in situ des caractéristiques mécaniques du béton d'un ouvrage, Dépôt Brevet N° 34452 FR - FR 2102952.
6. K.K. Sideris, P. Manita, K.Sideris, "Estimation of ultimate modulus of elastic and Poisson ratio of normal concrete", Cement & Concrete Composite ,vol 26, pp 623-631,2004