

# Corrélation d'images pour la détermination des contraintes dans les structures en béton armé

**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>, CLOET D.<sup>2</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** Le changement climatique modifie de façon intense l'environnement des infrastructures en béton armé : sécheresse, inondation, ... De plus, les défauts d'entretien de certaines de ces structures les rendent parfois dangereuses. Des questions se posent sur leur durabilité et leur capacité structurelle. Quel avenir pour des structures vieillissantes et/ou endommagées : destruction/reconstruction ou rénovation/réhabilitation ? Dans ce contexte, les autorités sont obligées de mettre en œuvre des moyens de surveillance et de contrôle pour ces infrastructures, notamment la détermination des contraintes dont traite notre travail. Le papier décrit la technique développée qui est basée sur la libération locale des contraintes. Le défi à relever consiste à utiliser la technique de corrélation d'images pour déterminer des micro-déplacements dans les structures. Par la suite, la technique permet d'accéder à certains paramètres mécaniques objectifs du béton.

**Mots-clefs** Structural Health Monitoring, DIC, contraintes, champ de déplacement, diagnostic

## I. INTRODUCTION

Des méthodes existent afin de déterminer les contraintes dans les structures. Les procédés SlotStress® [1] et InsideStress peuvent être cités. Ces méthodes sont basées sur la libération des contraintes et la détermination des déplacements de la structure par des capteurs comme des jauges de déplacements ou des cordes vibrantes.

Nous avons développé une méthode où les déplacements sont obtenus à partir de la méthode de corrélation d'images (DIC), utilisée depuis les années 90 [2]. Le principe est de comparer la position de points de référence sur une photo A et sur une photo B, A et B représentant deux états différents d'un même objet. La DIC est utilisée en génie civil notamment pour quantifier et qualifier les phénomènes de fissuration. Dans notre cas d'étude, les déplacements relatifs sont de l'ordre de 1  $\mu\text{m}$  pour des contraintes appliquées de l'ordre de 1 MPa.

La suite de cette contribution présente la méthode utilisée et sa mise en place en laboratoire. La résolution ainsi que les résultats obtenus sont discutés.

## II. METHODOLOGIE

*A. Méthodologie suivie et hypothèses de calculs*

La méthodologie suivante est utilisée :

- Détermination des propriétés matériaux en fonction des données de l'eurocode 2.
- Mesure des déplacements par la corrélation d'images après relâchement local des contraintes : identification des fonctions de champ de déplacements soit  $U_x(x,y)$  et  $U_y(x,y)$ .
- Calcul des déformations (notées  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$  et  $\varepsilon_{xy}$ ).
- Calcul des contraintes (notées  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{xy}$ ) en faisant l'hypothèse que le matériau suit une loi de comportement élastique et linéaire, selon la loi de Hooke. L'ordre de grandeur des contraintes testées est de quelques MPa, ce qui engendre de petits déplacements, de l'ordre du micromètre pour un module autour de 35 000 MPa.
- Calcul des contraintes principales (notées  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ ) et de leur orientation par rapport à la verticale (notée  $\varphi$ )

### B. Méthode expérimentale

Le principe de l'expérience est de calculer la contrainte appliquée sur un plot en béton en mesurant de micro-déplacements lors d'un relâchement local de contrainte. Un bloc de béton sans armatures C 40/50 représentatif d'une portion de poteau (base : 25cm X 15cm, longueur : 1m20) est testé. Un dispositif composé d'une caméra SVS-VISTEK (résolution 4 096 pixels X 3 000 pixels) avec son support et d'une carotteuse HITLI DD 30-W avec son support, est positionné dans le tiers central du plot afin d'éviter les effets de bords (Figure 1). Un mouchetis aléatoire et fin est appliqué sur une zone de 4 x 6 cm (taille photo), créant ainsi un grand nombre de points de référence d'une photo à l'autre. Une force de compression de 90 kN est appliquée sur le plot 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 avec un diamètre de 3 cm et une longueur de 6 cm. Une seconde série de photo est enregistrée (état non contraint). La zone d'étude du champ de déplacement correspond au diamètre de la carotte.

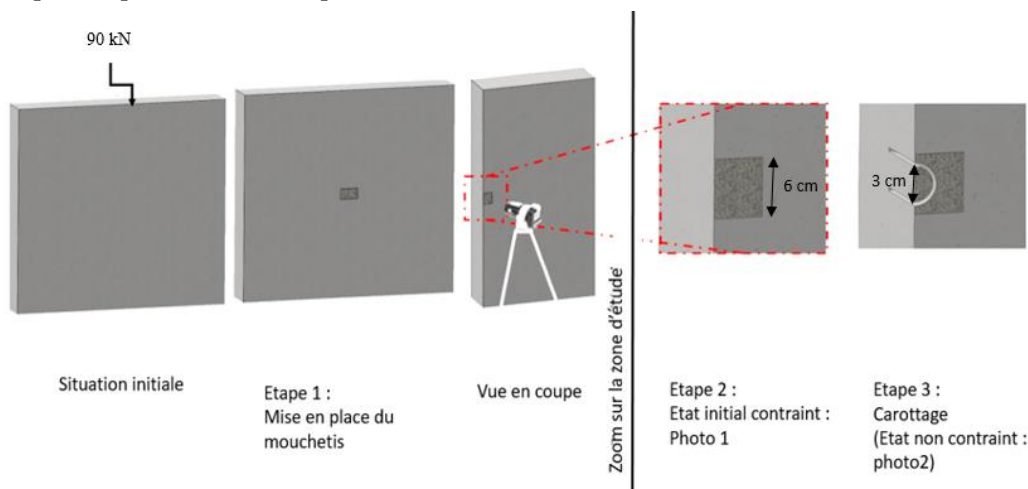


FIGURE 1. Vue de l'expérience sur un mur

Pour la suite de l'étude les paramètres matériaux ont été fixés à partir des données de l'Eurocode 2, soit un module d'Young de 35 220 MPa pour le béton (C 40/50) et un coefficient de Poisson entre 0,2 et 0,3. Elles pourraient aussi être déterminées expérimentalement, ce qui a déjà fait l'objet de travaux précédents [3,4].

### C. Méthode d'analyse d'image

Pour une contrainte de 2,4 MPa, avec un module d'Young  $E = 35\,220$  MPa, la déformation verticale de relâchement de la surface de la carotte devrait être de  $6,86 \cdot 10^{-5}$ . Pour un diamètre d'étude de largeur initiale de 2 000 pixels (soit 3 cm), le déplacement maximal attendu est de 0,14 pixel ( $2\ \mu\text{m}$ ) soit un déplacement de 0,07 pixel de part et d'autre de la carotte. Nous souhaitons une précision de 1 MPa sur la contrainte représentative des contraintes normales souvent faibles dans les structures en béton armé. La résolution de la mesure attendue est donc de  $1/100^{\text{e}}$  de pixels.

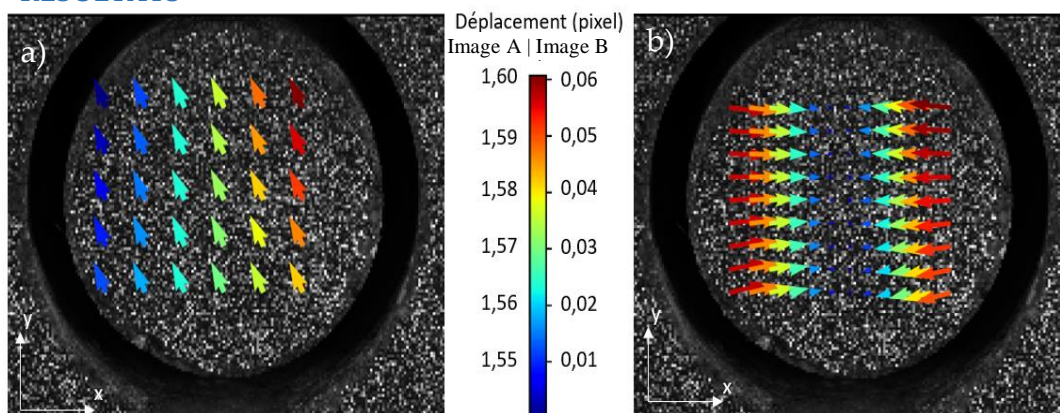
Deux éléments sont à fixer dans la définition de la méthode de la corrélation d'images. Dans un premier temps le champ de déplacement a été interpolé de manière globale sur toute la surface de la carotte. Le choix de cette interpolation permet de distinguer le bruit du champ de déplacement attendu et ainsi de s'affranchir de l'imprécision due à ce bruit. Dans un second temps, le champ de déplacement attendu est modélisé par une fonction bi-linéaire sur le plan de l'image.

3 déplacements parasites doivent être identifiés et soustraits au champ de déplacement obtenus. Tout d'abord les mouvements de corps rigide en translation et en rotation, facilement calculés, sont supprimés. Ils correspondent à un mouvement relatif provenant soit du déplacement absolu de la caméra, soit du déplacement absolu de la carotte. Ensuite les déplacements hors-plan de la surface de la carotte causés par l'effet Poisson et qui engendrent un effet parasite de gonflement sur les images, sont également corrigés, telle que :

$$\varepsilon_{\text{parasite}} = -\frac{\varepsilon_{xx \text{ mesurée}} + \varepsilon_{yy \text{ mesurée}} \cdot \nu}{1 + \nu} \quad (1)$$

L'utilisation de cette méthode fait intervenir une variable, le coefficient de Poisson  $\nu$ . La valeur de cette variable est imposée. Une étude de sensibilité des résultats par rapport au coefficient de Poisson est réalisée pour des valeurs comprises entre 0,20 et 0,30, prises avec un intervalle de 0,01.

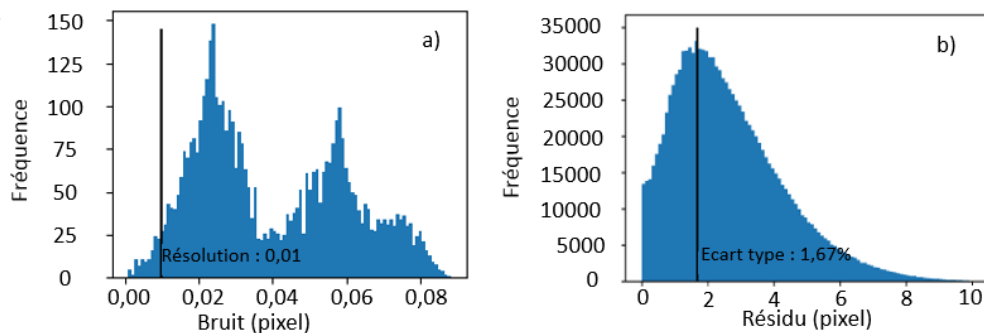
### III. RESULTATS



**FIGURE 2.** Champs de déplacements causés par le relâchement local des contraintes : a) le champ de déplacement global et b) le champ de déplacement sans mouvement de corps solide.

A partir de la méthode de corrélation d'images à interpolation globale, le champ de déplacements est obtenu (Figure 2.a)). Le champ de déplacements sans mouvements de corps solides (Figure 2.b) ne correspond pas aux déplacements relatifs à une compression verticale. Il est nécessaire de supprimer les déformations parasites à partir de l'équation 1.

Une étude de sensibilité sur les valeurs du coefficient de Poisson a été réalisée. Une variation de 5% du coefficient de Poisson engendre une variation d'environ 10 % sur  $\sigma_{yy}$ . Nous avons défini un coefficient de Poisson cohérent de 0,25. Les contraintes dans le plan sont calculées telles que :  $\sigma_{xx} = 0,24 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{yy} = 2,65 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{xy} = -0,31 \text{ MPa}$ . Les contraintes et directions principales obtenues sont les suivantes :  $\sigma_1 = 2,66 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_2 = 0,20 \text{ MPa}$  et  $\theta = 7,23^\circ$ . La valeur des contraintes principales suggèrent une application de la force non uniaxiale. La résolution de la mesure est de 10%. Le bruit de la mesure présenté en Figure 3.a) est supérieure à la résolution de 0,01 pixel, mais il n'engendre pas d'erreur significative sur les résultats. En effet le pic de l'erreur de mesure (résidu) en tous points de l'images est inférieur à 2% (Figure 3.b)). Ces valeurs de résidus valident nos résultats.



**FIGURE 3.** Histogramme correspondant en a) aux déplacements relatifs au bruit de mesure et en b) à l'erreur de mesure soit le résidu

## CONCLUSION

Premièrement il est montré que la méthode de corrélation d'images permet de déterminer des déplacements de l'ordre de  $1 \mu\text{m}$ , soit une déformation de l'ordre de  $\varepsilon = 10^{-5}$  sur une structure de type poteau en béton. Cette étude a permis de définir une contrainte de quelques MPa avec une résolution de 10%, malgré les difficultés de mise en œuvre de l'essai. Ces résultats nous confortent sur la démarche adoptée concernant à la fois la gestion du bruit de mesure, la méthode de correction des déformations parasites et les hypothèses de calculs. Outre le fait d'obtenir des résultats cohérents elle permet de visualiser en 2D le champ de déplacement de la zone d'étude sur une zone de quelques dizaines de  $\text{cm}^2$  contrairement aux capteurs qui donnent une information en un point.

## REFERENCES

1. 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
2. A. Carpiuc-Prisacari, M. Poncelet, K. Kazymyrenko, F. Hild, H. Lecler, « Comparison between experimental and numerical results of mixed-mode crack propagation in concrete: Influence of boundary conditions choice », *Cement and Concrete Research*, 329-340, 2017
3. M. Allain, O. Plé, N. Prime, E. Roux, P. Vacher. 2019. Mesure de micro-déplacements par corrélation d'images : identification du module d'Young du béton, *Troisièmes Journées thématiques Techniques d'Imagerie pour la Caractérisation des Matériaux et des Structures du Génie Civil*, 4 et 5 avril 2019 à Champs-sur-Marne.
4. M. Allain, N. Prime, O. Plé, P. Vacher, E. Roux, F. Pellier. 2019: Système de détermination des propriétés mécaniques du béton in-situ, *E-soleau DSO2019002966*.