Analyse de contraintes in situ dans les structures en béton armé

Marie ALLAIN[1,2]

[1] *Léon Grosse, 10 Boulevard de Russie, 73100, Aix-les-Bains, France*

[2] *Université Savoie Mont-Blanc, CNRS, LOCIE, 73000, Chambéry, France*

RESUME Le béton armé a été utilisé en grande quantité à partir des années 50. Or les règles de conception utilisées préconisent des durées d'exploitation limitées de 50 à 100 ans, ce qui signifie qu'aujourd'hui nous arrivons en fin de vie théorique de certains ouvrages en béton armé. De plus, 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 (ouvrage et bâtiment) a émergé. Ces ouvrages vieillissants et dégradés nécessitent une surveillance. C'est dans ce contexte que se situe notre travail. La présente contribution décrit une technique, basée sur un relâchement local 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 en béton armé. Cette technique est également utilisée pour déterminer certains paramètres mécaniques du béton.

Mots-clefs Contrainte, Béton armé, Module de Young, Corrélation d'images numériques, Diagnostic structurel.

I. INTRODUCTION

L'étude de l'état de santé des structures est un sujet qui prend de plus en plus d'importance aujourd'hui (projet de loi articles L. 153-1 et L. 153-2). De nombreuses techniques de diagnostic structurel existent. Elles permettent d'obtenir des informations sur la localisation et l'état de corrosion des armatures, la détermination des zones de cavité, la mesure de la résistance aux chocs, la détermination du comportement dans le temps des structures à l'aide de techniques accéléromètriques, de jauges de déformations, de fibres optiques, ... Peu de technique existent pour la détermination des contraintes, citons ; la technique EVE basée sur l'étude des vibrations ambiantes des structures ; le procédé SlotStress® [1] qui utilise la relaxation locale des contraintes et le rechargement de cette zone ; le procédé InsideStress [2] qui utilise également la libération des contraintes locales et la détermination des déplacements de la zone d'étude à partir de capteurs à cordes vibrantes. Ces méthodes présentent des inconvénients et ne permettent pas d'atteindre les objectifs suivants : obtenir les trois tenseurs de contraintes sur la zone d'étude avec une estimation à +/- 1 MPa sur les composantes du tenseur de contraintes. Une valeur de 1 MPa sur une zone de 30 mm de diamètre, pour un béton standard, oblige à une observation des déplacements de part et d'autre du trou de 0,45 µm ou de 0,045 pixel avec notre appareil d'imagerie (résolution 4096 x 3000 pixels et objectif de focale 50 mm). De plus, il nous semble nécessaire, pour qualifier la dégradation du matériau au cours du temps, d'obtenir une mesure du module d'Young du

matériau comme le suggère les travaux de H. Wang et K.K Sideris [3][4]. A cela, s'ajoute des exigences industrielles en vue d'une industrialisation. Dans cet article, nous présenterons les étapes de la méthode à travers un exemple réalisé in situ. En amont, des études ont été réalisées en laboratoire pour permettent de calibrer et valider la méthode présentée ici [5].

II. METHODE DEVELOPPEE

La solution proposée consiste à développer un outil d'analyse de contraintes in situ dans les bétons par relâchement local de contraintes, associé à une identification des déformations puis des contraintes. Ce dispositif devra aussi permettre d'identifier le module de Young in situ et de fournir trois termes du tenseur des contraintes dans le plan (σx, σy et τxy) avec une incertitude de mesure de l'ordre de 1 MPa.

Après études des alternatives existantes, nous proposons la solution ci-dessous, composée de deux étapes. La Figure 1 représente le déroulement de la première partie de l'analyse des contraintes. Elle consiste à relâcher localement les contraintes par un carottage. Les déplacements de la surface au niveau de la carotte sont déterminés par corrélation d'images numériques, noté CIN, ce qui permet d'avoir une mesure de champ de déplacement et non une mesure ponctuelle de déplacement, entre l'état contraint (avant carottage) et l'état non contraint (après carottage). Ces déplacements pourront alors être utilisés dans le calcul des déformations. Nous nous appuierons sur une hypothèse de contraintes hors plan σzz, τxz, τyz nulles, choix correct en surface mais sans doute critiquable en profondeur. L'identification des contraintes à partir d'une mesure des déformations en surface nécessite une connaissance des paramètres matériau E et ν. La valeur de ν est supposée connue à partir de la littérature pour des bétons standards (EC2)[6]. L'obtention du paramètre matériau E peut être réalisée en laboratoire sur les échantillons récupérés sur site. Dans une logique industrielle, l'interprétation de l'EC2 pour E sera utilisée. La Figure 2 illustre cette seconde partie de l'analyse. Pour cela la carotte est retirée du mur et une pression contrôlée est appliquée dans l'espace libéré. Les déplacements du béton sont également obtenus par CIN, puis le ou les modules de Young Ex, Ey en sont déduits par analyse inverse.

A partir des déplacements obtenus par le relâchement local des contraintes en surface (Partie 1) et de l'identification du module de Young (Partie 2), l'état de contrainte peut-être calculé.

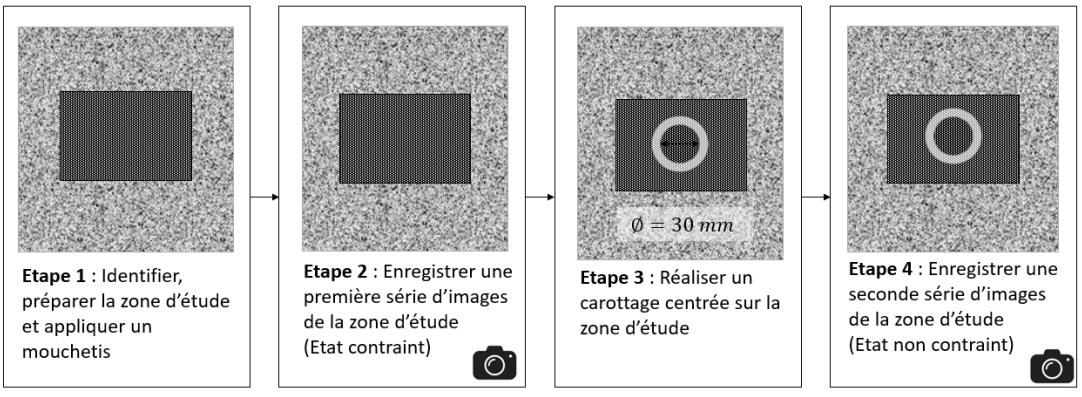

FIGURE 1. Etape de la première partie de la méthode permettant de déterminer les déformations lors du relâchement local des contraintes

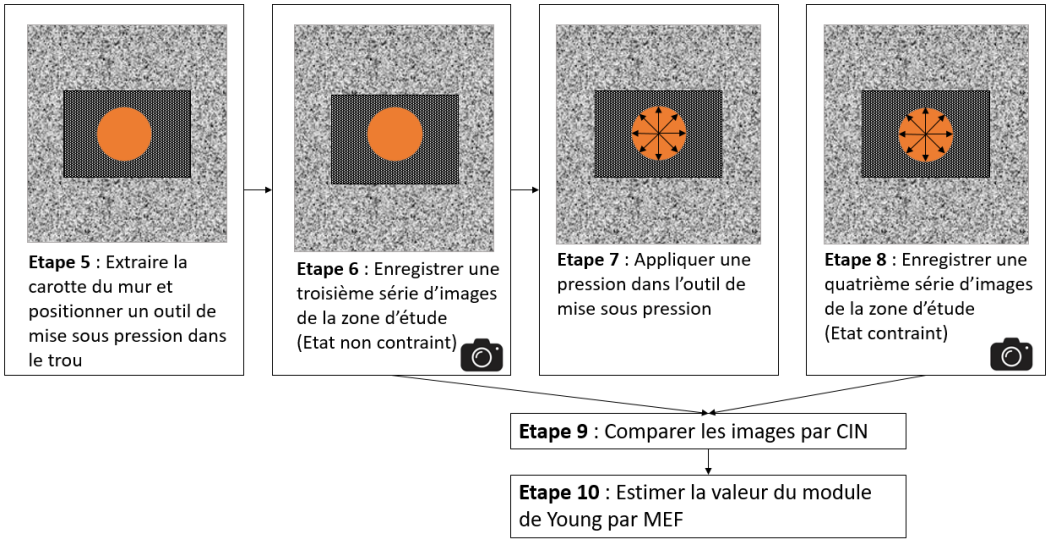

FIGURE 2. **Etape de la deuxième partie de la méthode permettant d'identifier le module de Young**

II. DETERMINATION DE L'ETAT DE CONTRAINTES

A. Matériel

Le relâchement local des contraintes est réalisé en carottant la zone d'étude sur un diamètre interne de 30 mm et une longueur de 70 mm. Ce ratio supérieur à 2 entre la profondeur et le diamètre de la carotte a été obtenu numériquement afin d'être quasi-libre de contrainte en surface de la carotte sans endommagé structurellement l'élément étudié. Le carottage est réalisé à partir d'un outillage standard soit une carotteuse positionnée perpendiculairement sur l'élément étudié via un système de mise sous vide. Au préalable, la zone d'étude est déterminée en effectuant une recherche d'armature afin de se positionner entre les aciers pour éviter de les endommager lors de l'usinage. Une fois la zone d'étude identifiée, celle-ci est préparée : ponçage de la zone pour enlever l'enduit éventuel, lissage de la zone pour boucher les aspérités, application d'un mouchetis noir et blanc aléatoire en vue de l'utilisation de la CIN (Figure 1, Etape 1). Le dispositif d'imagerie est composé d'une caméra SVS-VISTEK et d'un objectif ainsi que de panneau LED. L'axe optique de la caméra est de 15° par rapport à la zone d'étude pour faciliter la mise en œuvre du carottage (Figure 3).

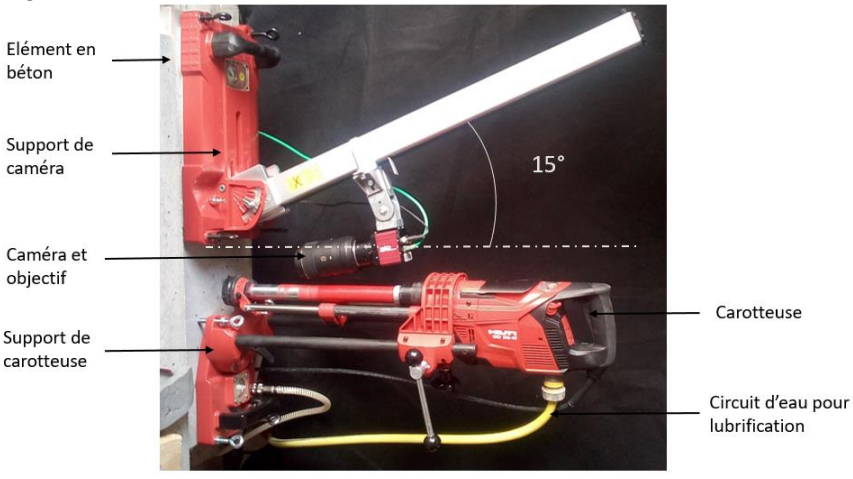

FIGURE 3. **Une partie des éléments utilisés pour le dispositif de relâchement local des contraintes**

B. Corrélation d'images numériques

Apparue dans les années 80, cette approche permet d'identifier des déplacements à la surface d'objets plans (CIN 2D) ou sur des surfaces gauches dans le cas de l'utilisation d'un dispositif stéréoscopique [7]. Elle se base sur une hypothèse de conservation du flot optique entre les images analysées. Le principe consiste à identifier des champs de déplacement entre deux images d'un même objet à partir de la distribution des niveaux de gris autour de points de repère. La conservation du flot optique qui lie les images de référence f (X) et déformée g(X) sur laquelle l'effet d'un déplacement apparaît s'écrit :

$$f(X) = g(X + u(X))$$

avec X correspondant au vecteur position de coordonnées image (x, y, 0) et u(X) la forme du champs de déplacement. Les fonctions f(X) et g(x) correspondent à la valeur du pixel en niveau de gris [8].

La forme du champ de déplacement u (X), dépend des fonctions de déplacement choisies. Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser une fonction de déplacement bi-linéaire, telle que:

$$ux\,(X) = ux\,(x0; y0) = a + b \times x0 + c \times y0 + d \times x0 \times y0$$
$$uy\,(X) = uy\,(x0; y0) = e + f \times x0 + g \times y0 + h \times x0 \times y0$$

Avec :

- a, b, c, d, e, f, g et h les paramètres de la fonction à déterminer,
- x0 et y0 les coordonnées de tout point de l'image de référence.

Dans nos travaux, deux types de méthode de corrélation sont utilisés : locale (logiciel 7D) et/ou globale (notre propre logiciel développé). L'avantage majeur de l'utilisation d'une approche à analyse locale est la possibilité d'observer des hétérogénéités de déformation sur la surface analysée, voire des fissures. Nous utiliserons cette approche pour vérifier l'homogénéité des déformations à la surface de la carotte. Cette méthode sera également nécessaire pour identifier le module de Young. L'interpolation locale consiste à déterminer les fonctions ux (x; y) et uy (x; y) pour tous les points de la grille d'étude. En conséquence, il y a autant de paires de fonctions que de points d'étude. L'approche à analyse globale (champ de déformation supposé constant) sera utilisée lors de l'analyse du relâchement des contraintes sur la carotte. L'interpolation globale permet de définir un couple unique de fonctions ux (x; y) et uy (x; y) satisfaisant les critères d'optimisation pour tous les points de l'étude. L'hypothèse d'une constante du tenseur de déformation sur la zone d'analyse est faite. La Figure 4 présente la méthode de CIN avec l'exemple d'un bloc de béton en tension, et nous pouvons visualiser les champs de déplacement obtenu par CIN locale et globale.

Dans le cas de notre analyse, et afin de réduire le bruit de mesure, une moyenne des niveaux de gris pour chaque pixel est réalisée sur une série de 10 images prises successivement pour chaque étape de l'analyse. Une fois les images moyennes obtenues elles sont comparées par CIN (à interpolation globale dans le cas de la détermination des déplacements au centre de la carotte). Les déplacements sont obtenus sur une surface de 20 mm x 20 mm, après avoir vérifié via la carte des résidus en niveaux de gris qu'il n'y avait pas d'hétérogénéité dans les déplacements. Les mouvements de corps solides en translation et en rotation sont supprimés. Ces mouvements peuvent correspondre à des mouvements du dispositif d'imagerie lors de la découpe. Ensuite ce sont les mouvements hors-plan, notamment causés par l'effet Poisson, qui sont supprimés afin

d'obtenir le champ de déplacements réel de la carotte. A partir des fonctions de déplacements, les champs de déformations sont calculés.

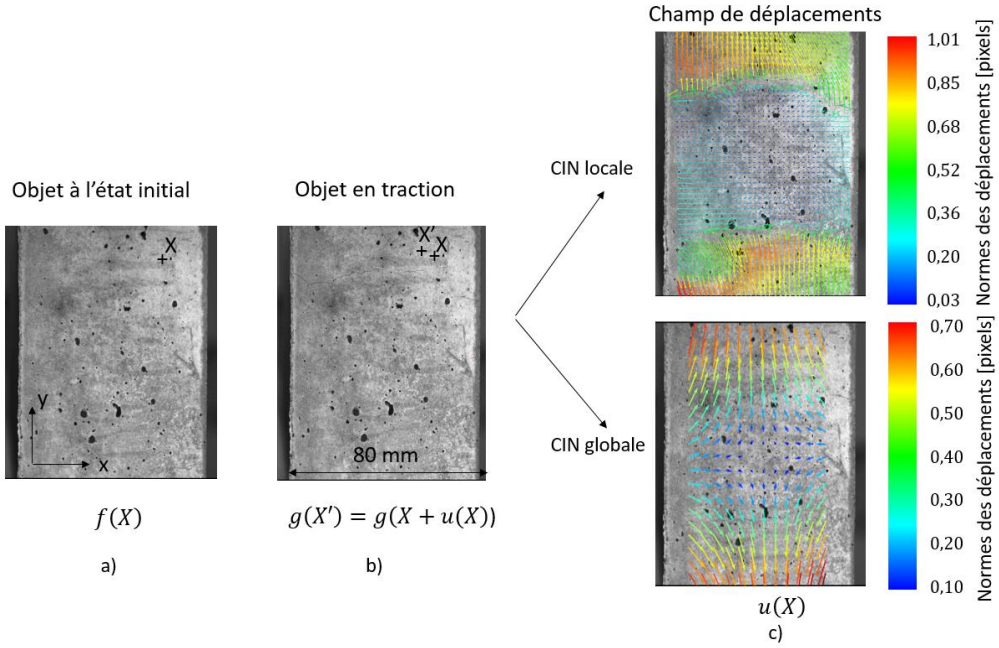

FIGURE 4. Principe de la corrélation d'image numérique avec en a) l'objet à l'état initial, en b) l'objet en traction et en c) les champs de déplacement pour une interpolation locale et globale

C. Verrous scientifiques et techniques

La précision de la mesure pour obtenir une estimation de la valeur de la contrainte à +/- 1 MPa, nécessite d'observer des déplacements dont l'ordre de grandeur est de 0,01 pixel, soit l'incertitude de mesure de la méthode de CIN. De ce fait nous avons étudié trois phénomènes pouvant impacter la précision de la mesure. Tout d'abord, nous avons mis en évidence et supprimé les effets de convection entre le mur et la caméra qui entrainent du bruit de mesure jusqu'à 10 fois supérieure à l'incertitude de mesure souhaitée. La suppression de ces effets convectifs a été possible en isolant la zone d'étude avec une gaine de protection non encombrante. Ensuite, l'utilisation de la lubrification à l'eau lors du carottage a été remise en question. Certes cela empêche l'élévation en température de la surface de la carotte et donc une déformation thermique parasite mais potentiellement elle peut engendrer des déformations hydriques. La faible quantité d'eau utilisée et le fait que la zone d'étude soit imperméabilisée grâce au mouchetis permet de conclure que la lubrification n'engendre pas de déformation hydrique parasite impactant la précision de mesure attendue, cela a été vérifiée dans la thèse de M. Allain [5]. Pour finir, nous avons étudié si l'inclinaison de l'axe optique de la caméra de 15° par rapport à la zone d'étude pouvait créer une erreur sur la mesure du champ de déplacement observé par le capteur optique à l'aide d'une étude numérique. Le résultat montre que les erreurs de déformations calculées sont de l'ordre de 3%, ce qui est négligeable dans notre cas [5].

D. Application in situ

L'analyse a été réalisée sur un poteau appartenant à une bibliothèque universitaire construite dans les années 1970. Le poteau est situé au rez-de-chaussée sous le magasin dans une zone la plus chargée du bâtiment. La charge est excentrée sur le poteau de quelques centimètres. Des fissures apparaissent en haut de ce poteau ce qui signifie que la face étudiée est certainement en traction. Le champ de déplacement obtenu par relâchement local de contraintes au centre de la carotte est présenté sur la Figure 5. On remarque que le champ de déplacement indique que la carotte s'est contractée lors du relâchement local des contraintes ce qui traduit que le poteau est en traction. A partir des fonctions de déplacement, les déformations sont calculées, en prenant en compte les effets hors-plan, telles que : $\varepsilon_{xx} = 1{,}16.10^{-5}$, $\varepsilon_{yy} = -5{,}80.10^{-5}$ et $\varepsilon_{xy} = -3{,}33.10^{-5}$.

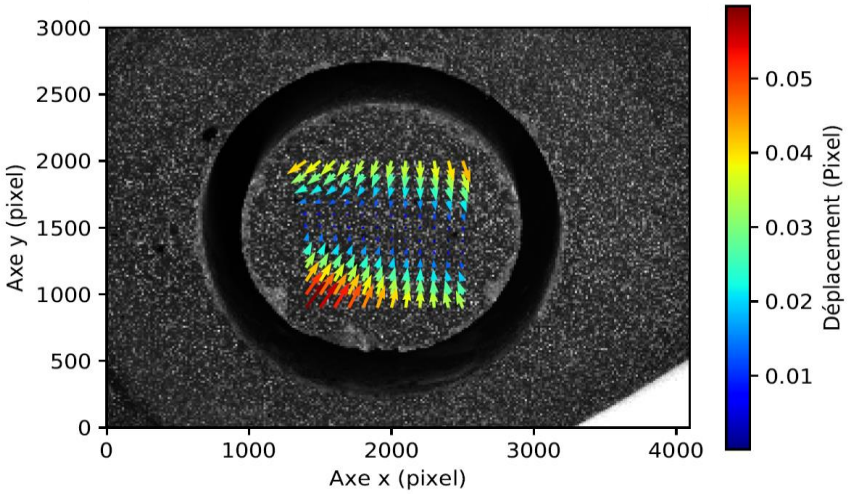

FIGURE 5. Champ de déplacement observable au centre de la carotte

III. IDENTIFICATION DU MODULE DE YOUNG

A. Principe

Afin d'identifier le module de Young du béton, un outil de mise sous pression a été développé en reprenant le concept de la cellule de gonflement du pressiomètre Ménard, utilisé pour des essais géotechniques. Un dispositif de contrôle de pression hydraulique externe (réf : GDS/200/03 de Sols Mesures, régulation à +/- 0,001 MPa) permet d'appliquer une pression jusqu'à 2 MPa à l'intérieur d'une fine membrane élastique dans le trou carotté. La membrane se gonfle et la pression est transmise aux parois cylindriques du béton. La pression appliquée est supposée être intégralement transmise sur les parois externes du carottage. En début d'essai une pression initiale de 0,03 MPa est appliquée pour maintenir le dispositif en position. Une premières série d'image est enregistrées (Figure 2, Etape 6), puis l'outil est mis sous une pression de 2 MPa (valeur pour laquelle les risques de fissurations du béton sont limités) et une seconde série d'image est enregistrée (Figure 2, Etape 8). Les deux séries d'image sont moyennées afin de minimiser le bruit caméra. Les images moyennes sont comparées par CIN à interpolation locale. On observe un champ de déplacement radial, ce qui traduit du comportement isotrope et homogène du béton malgré la zone d'étude réduite de quelques 100 cm². A partir de ce champ de déplacement, il est possible d'extraire une courbe représentant la norme des déplacements, notée Ur, en fonction du rayon, noté r (Figure 6-a). Cette courbe est par la suite comparée à des abaques créés à partir de simulations numériques et une étude paramétrique sur le module d'Young (Figure 6-b).

B. Modélisation numérique et abaques

La modélisation numérique par éléments finis via le logiciel Abaqus est réalisée afin d'obtenir les déplacements théoriques de notre structure lors de la mise sous pression du trou. Cette modélisation axisymétrique correspond à un trou usiné de 70 mm de profondeur sur un diamètre extérieur de 36 mm. De légers congés sont créés au niveau des angles pour éviter les concentrations de contraintes. Les armatures ne sont pas intégrées à la simulation car la zone d'étude ne concerne qu'un rayon de 40 mm c'est-à-dire assez loin des armatures. Le chargement correspond à une pression appliquée dans le trou sur une hauteur de 40 mm (longueur de la membrane de l'outil de mise sous pression) à partir d'une distance de 2 mm de la surface du trou. La valeur de 2 mm correspond à l'épaisseur de la rondelle qui maintient la membrane. En ce qui concerne les conditions aux limites, sur le bord horizontal en bas du modèle, une condition de déplacements uy=0 est appliquée. Sur tous les autres bords, la contrainte est nulle et les déplacements sont libres. Des éléments (CAX4R) relatifs à des éléments hexaèdriques linaires sont utilisés avec une taille proche de 1 mm. Les informations propres aux propriétés matériaux renseignées sont un module de Young (paramètres variant de 10 000 MPa à 50 000 MPa) et un coefficient de Poisson de 0,2 (valeur de l'Eurocode 2). Nous nous intéressons exclusivement aux déplacements sur la limite supérieure du modèle.

C. Application in situ

Sur ce poteau de la bibliothèque, la méthode permettant d'identifier le module de Young a été utilisée. D'après l'abaque de la Figure 6-b), composé des courbes de comportement théorique obtenues par simulations numériques pour des modules de Young de 20 000 MPa à 50 000 MPa, on remarque que la courbe relative aux déplacements expérimentaux moyens, notée Ur_m se superpose avec la courbe de l'abaque correspondant au comportement d'un béton de module de Young de 30 000 MPa. L'écart type moyen est de +/- 5 000 MPa, avec des valeurs plus dispersées entre 20 mm et 25 mm. L'hypothèse est que le béton a été fragilisé localement lors du carottage. En laboratoire afin de vérifier la méthode, nous avons réalisé des essais mécaniques sur la carotte de 30 mm x 70 mm afin de déterminer le module d'Young. La valeur moyenne du module de Young est de 28 826 MPa, ce qui est cohérent avec la valeur déterminée in situ.

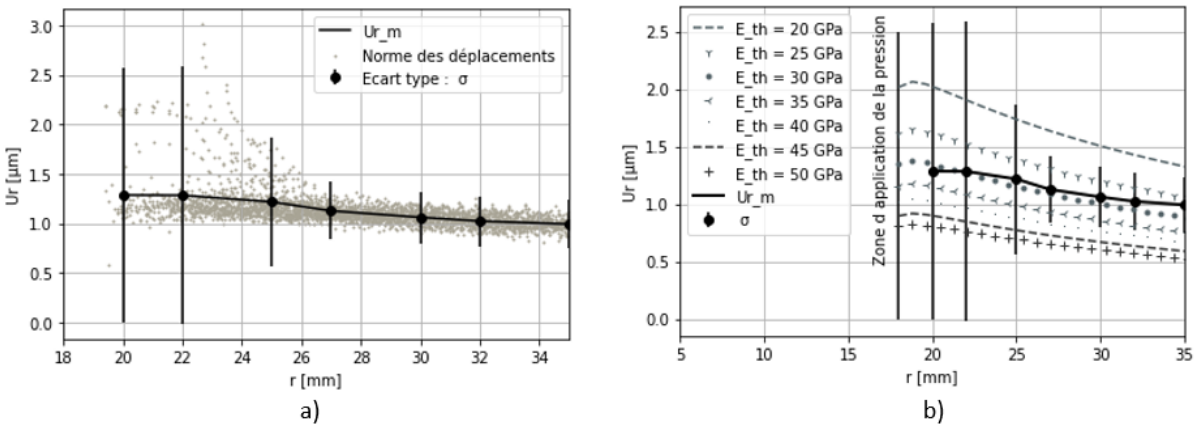

FIGURE 6. Normes des déplacements expérimentaux extraites de l'étude CIN (a) et superposition de la courbe expérimentale des déplacements moyens avec l'abaque (b).

III. CALCUL DE L'ETAT DE CONTRAINTE

Nous faisons l'hypothèse dans notre étude que le béton n'est pas endommagé, qu'il se trouve dans son domaine élastique et qu'il est homogène et isotrope. Avec l'hypothèse de la loi de Hooke nous obtenons des valeurs de contraintes principales de : σ_I = 2,16 MPa, σ_{II} = - 0,04 MPa avec une direction principales orientés à 24,5 ° de l'axe du poteau.
Le poteau est donc en traction avec une contrainte principale quasi-verticale de l'ordre de 2 MPa. Cette valeur semble cohérente.

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La méthode développée permet d'identifier in situ la valeur du module de Young mais également de déterminer les contraintes et directions principales in situ dans un élément de structure avec une incertitude de +/- 1 MPa. Nous montrons dans cet article un cas réalisé in situ mais de nombreux essais en laboratoire et in situ ont été réalisés avec des résultats qui semblent très prometteurs. Pour un diagnostic structurel cette méthode doit être couplée à d'autres méthodes donnant en particulier des résultats plus globaux (méthode vibratoire par exemple). En parallèle une comparaison avec les notes de calcul de l'ouvrage est nécessaire. En perspective, des recherches sur des bétons vieillis doivent être envisagées afin de quantifier les dégradations des matériaux sur les ouvrages en béton armé.

REFERENCES

1. Procédé de mesure de contrainte dans un élément de construction, brevet, numéro de publication : N 2812940.

2. Lamour, V., Tatin, M., and Le, T. Diagnosis of Songloulou Dam : Innovation stress measurement on concrete abutment. Cementys.

3. Wang, H. and Li, Q. (2007). Prediction of elastic modulus and Poisson's ratio for unsaturated concrete. International Journal of Solids and Structures, 44(5) :1370– 1379.

4. K.K. Sideris, P. Manita, K.Sideris, "Estimation of ultimate modulus of elastic and Poisson ratio of normal concret", Cement & Concrete Composite ,vol 26, pp 623-631,2004

5. M. Allain, « Analyse des contraintes in situ dans les structures en béton armée », Thèse, 01/2021 .

6. 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 Regulation305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].

7. Sutton, M., Wolters, W., Peters, W., Ranson, W., and McNeill, S. (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method. Image and Vision Computing, 1(3) :133–139.

8. 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