

Validation expérimentale de la conception bielles-tirants pour les structures massives en béton armé par l'analyse de déformations

Mihaja Razafimbelo^{1,2}

¹ Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, UMR 9026 LMPS – Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-Sur-Yvette, France

² Institute of Mechanical Sciences and Industrial Applications, EDF-CNRS-CEA-ENSTA UMR 9219, et EDF, Département de la R&D, Palaiseau, France

RESUME

La conception des structures en béton armé suit les prescriptions des codes et des normes (par exemple, ACI et Eurocode). La méthode des bielles – tirants est la seule approche détaillée dans les normes pour la conception des armatures des structures massives. Cette méthode suscite un grand intérêt et plusieurs techniques sont basées sur des stratégies automatiques (Chavez, 2015) et l'optimisation topologique (Liang, 2000). Cependant, elle est basée sur une hypothèse forte associée aux analyses élastiques linéaires (J. Schlaich, 1987) même si des analyses incluent aussi des développements des équations dans le cas inélastique (Hsu & Mo, 2010). En particulier, l'apparition de fissures pré-existantes, avec une compréhension du cisaillement (Mihaylov, Hannewald, & Beyer, 2016) est analysée ici lors de l'élaboration du modèle de type de bielles et tirants. Ce travail vise à comprendre le rôle d'un état initialement fissuré et donc de l'historique de chargement dans la conception et le choix des bielles et des tirants. Un test expérimental est analysé pour un corbeau à taille réelle chargé dans deux directions différentes dans le plan avec des forces non appliquées simultanément.

L'instrumentation utilisée, combinant la corrélation d'images numériques et la détection par fibre optique, permet de suivre l'essai pendant sa déformation et son endommagement et fournit un aperçu de l'historique de la fissuration et des déformations des surfaces visibles et de la masse. Les résultats fournissent des données essentielles sur l'évolution des champs mécaniques au sein de la structure sous différentes charges. Ces informations ont permis de clarifier le domaine de validité des hypothèses fondamentales des bielles – tirants et peuvent améliorer cette approche de conception.

Mots-clefs : Bielles-tirants, validation expérimentale, béton

I. INTRODUCTION

La méthode des bielles – tirants est proposée par les normes (par exemple Eurocode (EN1992-1-1), ACI (PRC-445) ou FIB ((fib), 2012) pour le calcul des armatures en acier dans les zones massives ou discontinues des structures en béton. Historiquement, elle dérive de la méthode dite de Ritter-Mörsch (Ritter, 1899) - (Mörsch, 1902) pour les poutres soumises au cisaillement, basée sur la détermination d'un treillis équivalent à la structure initiale pour supporter les forces externes. Le principe initial de détermination des bielles et tirants a été développé par Schlaich (Schlaich, 1987) et généralisé aux zones de discontinuité et aux zones massives.

Comme la plupart des méthodes traditionnelles de conception dans l'ingénierie pour le renforcement du béton est menée sur la base de l'hypothèse (1) que les forces et les contraintes soient obtenues dans

un domaine de comportement élastique linéaire, et (2) que ces calculs soient effectués sur des structures non armées. Ce papier traite pour la première fois les deux hypothèses précédentes, et plus particulièrement de l'un de ses corollaires, à savoir que l'historique de chargement n'a aucun effet sur la distribution actuelle des contraintes et sur les armatures en acier. Cette affirmation est discutable car la conception des structures en béton implique toujours la fissuration (ici nécessaire à l'identification appropriée des bielles).

Afin de discuter de la linéarité dans la conception, des tests expérimentaux ont été réalisés sur un type de structure rencontrée dans les constructions et sur lequel les calculs par la méthode bielles tirants sont appliquée, des structures de jonction comme un corbeau appelé aussi console courte. Il est instrumenté pour une évaluation en temps réel des champs mécaniques. Le corbeau a été soumis à deux forces appliquées l'une après l'autre. Pour les deux charges, elles ont été appliquées jusqu'à la fissuration du spécimen pour dépasser la phase élastique. L'essai avait deux objectifs différents. Tout d'abord, il a été réalisé pour comprendre comment la fissuration affecte la distribution des jambes de force sur le corbeau. Deuxièmement, il s'agit de fournir un ensemble de données de validation expérimentales concernant l'évolution de déformation et le modèle de fissure avec le même niveau de détails que dans les résultats éléments-finis. L'essai présenté ici doit être considéré dans une série de 3 sous-essais impliquant différentes combinaisons de forces afin de remettre en question la pertinence des hypothèses de superposition dans l'historique de la fissuration pour l'optimisation des bielles-tirants.

II. CAMPAGNE EXPERIMENTALE : CORBEAU

La géométrie du corbeau et les détails de l'armature sont définis dans la figure 1. Le cadre de référence pour la méthode est un béton homogène, élastique et sain (c'est-à-dire non armé). Une armature minimale a été ajoutée pour maintenir la structure pendant la préparation des essais et l'application des forces. L'armature sert également de support aux fibres optiques. Des tiges et des plaques d'ancrage sont insérées pour le maintien et l'application de la force mais aussi pour les conditions aux limites.

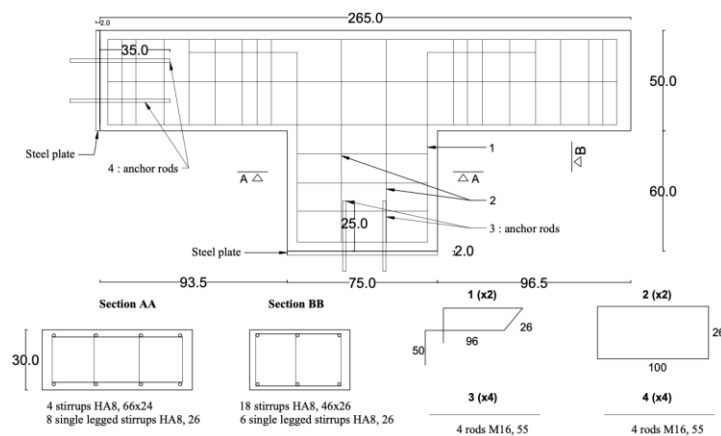


FIGURE 1. Dimensions de l'éprouvette et plan de ferrailage de l'éprouvette

A. Propriété des matériaux

Un béton ordinaire de classe C30/37 (notation Eurocodes) est utilisé. Des essais de compression et de fendage réalisés 28 jours après le coulage du béton ont permis de connaître ses propriétés mécaniques. Les valeurs du module d'Young, de la résistance à la compression sont respectivement $E_c = 36,11$ GPa et $f_c = 35,40$ MPa (qui sont les valeurs moyennes sur 9 échantillons de compression avec un écart type resp. de 0,596 GPa et 1,73 MPa) et la résistance à la traction $f_t = 3,1$ MPa (moyenne sur 9 échantillons avec 0,24 MPa comme écart type). Ces résultats correspondent à des valeurs élevées pour un béton de la classe choisie. L'essai sur le corbeau est réalisé à 30 jours d'âge du béton.

B. Protocole d'essai

Le corbeau est chargé de manière quasi-statique par deux forces appliquées dans deux directions différentes, F1 (en rouge) et F2 (en bleu) sur la figure 2. Tout d'abord, F1 a été appliqué jusqu'à la fissuration, puis F2 est appliqué jusqu'à la rupture complète.

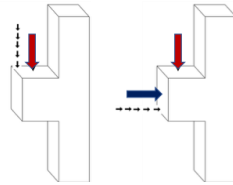


FIGURE 2. Phases de chargement

L'éprouvette, étant très faiblement renforcée, a été posée horizontalement pour s'assurer qu'elle reste intacte avant l'essai et ainsi pouvoir contrôler toutes les fissures. En outre, l'effet de la gravité a également été négligé afin de contrôler l'essai avec seulement 2 forces. L'échantillon a été posé sur une structure en bois ; une plaque de téflon a été ensuite placée et puis une plaque en acier comme coffrage perdu. Le téflon et l'acier ont été choisis pour assurer une friction minimale. Ainsi, un glissement parfait est assuré pour que le poids propre du corbeau ne crée aucun frottement gênant le chargement. La plateforme d'essai est isolée du sol au moyen de coussins d'air. Ce système permet de réduire les vibrations de l'éprouvette pendant l'essai, qui pourraient augmenter les erreurs liées à la corrélation des images numériques et aux quantités mesurées d'intérêt.

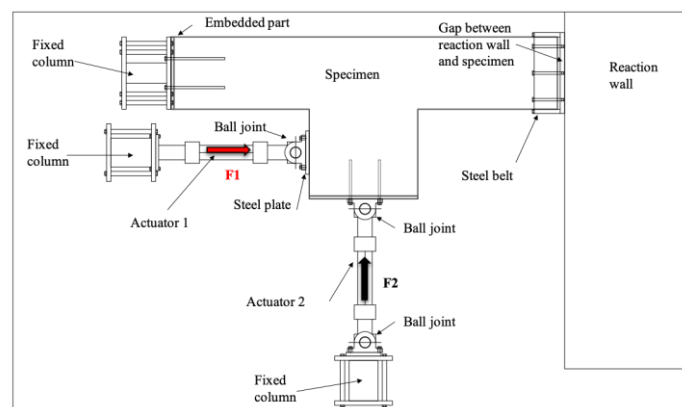


FIGURE 3. Vue en plan du dispositif du système

Les charges sont appliquées à l'aide de vérins hydrauliques. Leur système de commande servovalve avec les capteurs de déplacement et de force est monté sur la plateforme d'essai. Des rotules sont utilisées pour appliquer les chargements, évitant ainsi l'introduction de moments. Le chargement est contrôlé en déplacement, avec une vitesse de chargement de $5 \mu\text{m/s}$. La première charge augmente jusqu'à la formation des premières fissures, puis le régime de chargement change en maintenant l'effort du premier vérin constant et la deuxième charge est appliquée. Concernant les appuis aux extrémités du béton, le premier appui est réalisé par des tiges d'ancrage noyées dans le béton et fixées à une plaque d'acier collée à l'éprouvette puis fixée à la plateforme par l'intermédiaire d'une colonne rigide (à gauche sur la figure 2). Sur le second support (à droite sur la figure 2), une ceinture d'acier entourant le béton permet un glissement dans la direction de l'axe de la colonne mais empêche les rotations et les mouvements latéraux.

C. Dispositifs de mesure

Le système d'instrumentation comprend huit caméras qui permettent l'acquisition d'images numériques pendant toute la durée de l'essai. Des images ont été prises de la surface supérieure et d'une face verticale sur l'épaisseur du corbeau (Figure 3, à gauche). Des fibres optiques ont été placées à l'intérieur de l'éprouvette et fixées aux barres d'armature pour évaluer la déformation en des points

spécifiques à l'intérieur du béton. Les fibres ont été placées dans le béton près des surfaces supérieures et inférieures, et fournissent des informations complémentaires par rapport à la corrélation puisque les déformations sont mesurées dans la masse et pas seulement sur les surfaces externes.



FIGURE 4. Photos du set-up expérimental

a) *Corrélation d'images numériques*

La corrélation d'images numériques est actuellement utilisée en mécanique comme une technique expérimentale permettant de mesurer un champ de déplacement en faisant correspondre les images numériques d'un objet avant et pendant sa déformation. Le principe de la corrélation d'images numériques est basé sur le suivi d'informations d'une image dite « de référence » dans les images suivantes, souvent appelées « images déformées ». Tous les algorithmes commencent par ce que l'on appelle la "conservation de la luminosité". Le concept est qu'un point matériel aura le même niveau de gris et la même intensité dans chaque image, quelle que soit sa position dans l'image. En l'absence de bruit d'acquisition, il ne devrait pas y avoir de différence entre le niveau de gris d'un point matériel P désigné par le vecteur \underline{x} dans l'image de référence f , et celui du même point matériel dans une seconde image g où l'on suppose que le point s'est déplacé d'un déplacement $\underline{u}(\underline{x})$. Mathématiquement, cela s'exprime comme suit

$$f(\underline{x}) = g(\underline{x} + \underline{u}(\underline{x})) \quad (1)$$

En considérant la conservation de la luminosité pour tous les points matériels dans la région d'intérêt (ROI), une fonction de coût des moindres carrés se lit :

$$\mathbf{X} = \int_{ROI} \left(f(\underline{x}) - g(\underline{x} + \underline{u}(\underline{x})) \right)^2 d\mathbf{x} \quad (2)$$

Les seules inconnues sont les paramètres du champ de déplacement qui minimisent la fonction de coût précédente. Pour avoir confiance dans les mesures, des cibles de calibration (CC) ont été fixées à la plateforme, découplées du spécimen, et vues par les caméras. Maintenus en place, ces cibles de calibration permettent de corriger les petites dérives. La corrélation des images permet d'obtenir un champ de déplacement puis en le dérivant, un champ de déformation. Pour cette étude, nous utilisons d'abord les caméras indépendamment les unes des autres pour localiser les fissures. Nous voulons identifier les fissures lors du premier chargement avant rupture puis les fissures après le second chargement en maintenant le premier vérin.

b) Mesures par fibres optiques

Les fibres optiques sont actuellement utilisées pour la surveillance de l'état des structures en raison de leurs multiples avantages tels que la possibilité de mesures continues, leur petite taille et le fait qu'il s'agit de capteurs passifs. Les fibres qui utilisent la diffusion de Rayleigh ont été sélectionnées. Cette diffusion Rayleigh utilise les hétérogénéités du profil d'indice le long de la fibre. Une impulsion laser est envoyée et se propage dans la fibre pour ce type de capteurs basés sur la diffusion de Rayleigh. En raison des hétérogénéités de la silice, une partie de la lumière est rétrodiffusée en chaque point. La puissance de cette lumière rétrodiffusée est détectée à l'extrémité de la fibre connectée à un réflectomètre. Le temps entre l'émission du laser de pompe et la réception du signal réfléchi permet de localiser la position de l'élément diffuseur. Lorsque la rétrodiffusion Rayleigh est mesurée dans un état non perturbé et sur une certaine plage spectrale, et que la réponse de cette signature est corrélée dans un état perturbé (par la température, la déformation ou autre), un décalage spectral est détecté. Ce décalage spectral de Rayleigh $\Delta\nu^R$ dépend à la fois de la température ΔT et de la déformation ε (allongements relatifs) :

$$\Delta\nu^R = C\varepsilon^R \cdot \varepsilon + CT^R \cdot \Delta T \quad (3)$$

Où $C\varepsilon^R$ et CT^R sont les coefficients de calibration pour la déformation et la température relative, respectivement. Les souches mécaniques sont obtenues avec le décalage spectral de Rayleigh affecté par le coefficient de calibration avec la condition nécessaire de stabilisation thermique dans le béton.

III. RÉSULTATS

A. Analyse post-mortem de l'éprouvette

L'analyse post-mortem du spécimen commence par l'observation des fissures principales. La première fissure apparaît suite au premier chargement et le deuxième dans la deuxième phase de chargement, c'est-à-dire avec le chargement du deuxième vérin.

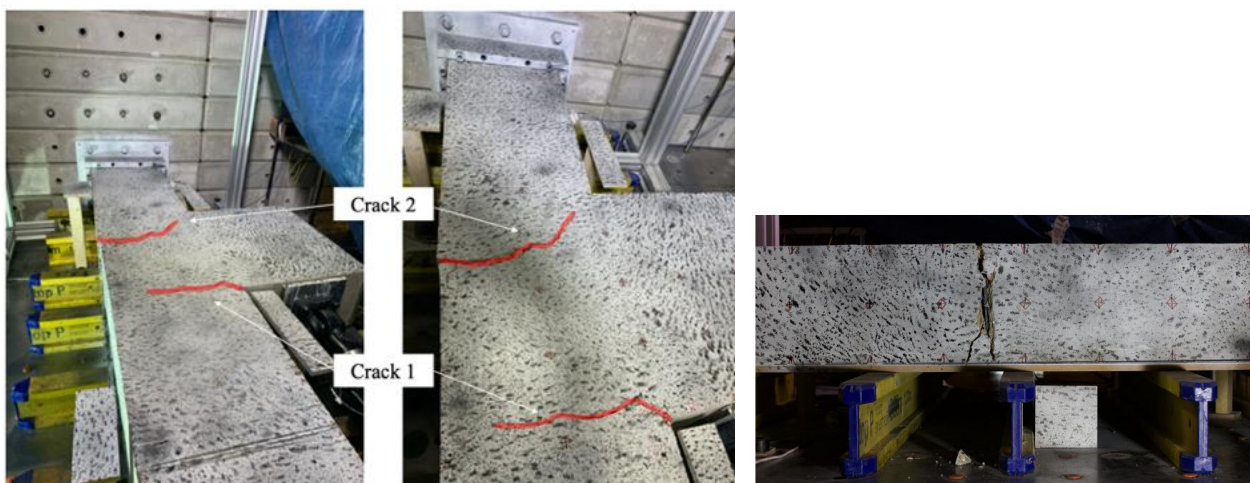


FIGURE 5. Deux principales fissures en surface de l'éprouvette (a) et fissure dans la tranche (b)

B. Courbe résultat de l'essai

La FIGURE 6 montre les courbes forces vs. déplacements pour les deux vérins, avec les déplacements mesurés grâce à la corrélation d'images numériques. On peut identifier certains instants caractéristiques. Pour le premier vérin (courbe rouge), l'instant T0 marque le début de l'essai. L'instant T1 correspond à une diminution de la force appliquée. Cette baisse marque la fin de la phase élastique.

L'instant T2 montre une forte baisse de l'intensité de la charge (de 80 kN à 30 kN), et représente une rotation de la maquette ainsi qu'une ouverture de fissure. Cette rotation est observée sur les images numériques et ces dernières serviront à caractériser ce mouvement de corps rigide. Cependant, après cette chute qui correspond à un mouvement rigide, le vérin se remet en place et on a une reprise de la rigidité entre T2 et T3.

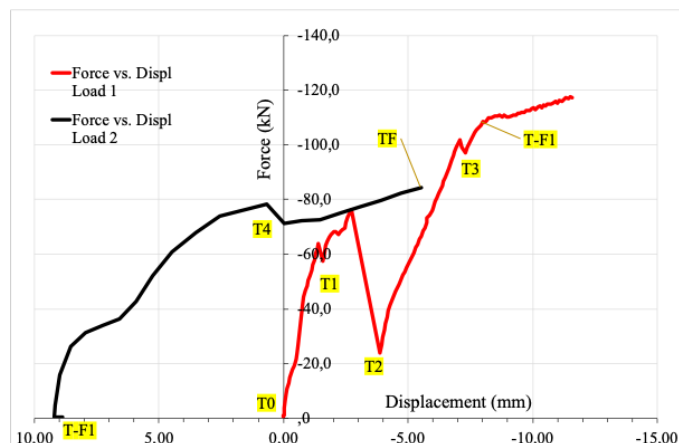


FIGURE 6. Courbe Force vs. Déplacement des deux vérins

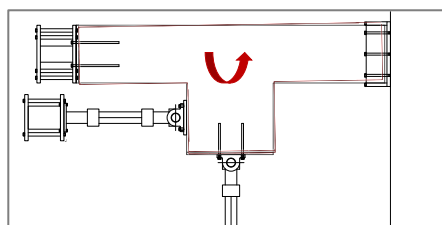


FIGURE 7. Rotation globale de l'éprouvette

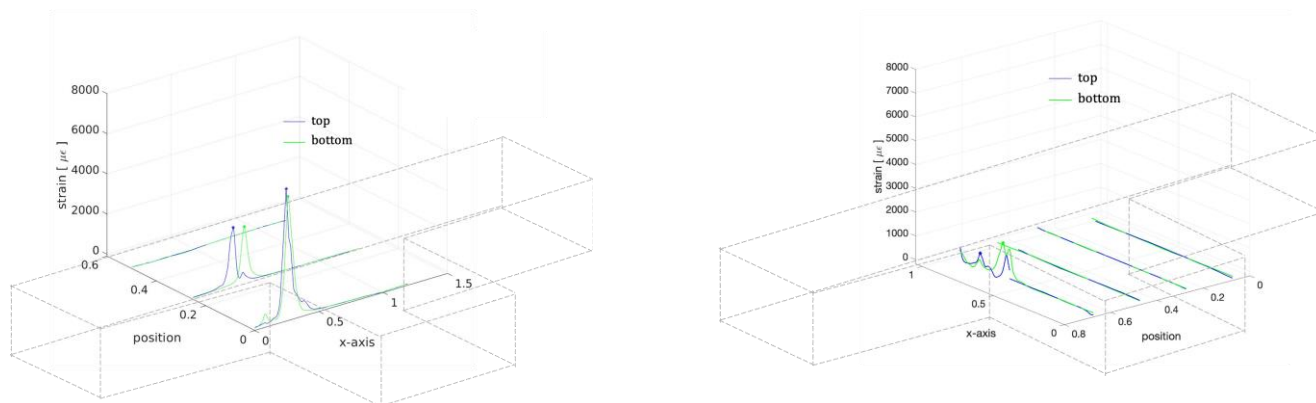


FIGURE 8. Niveaux de déformations dans le corbeau à T3, fibres dans le poteau (a) et fibres dans la console (b)

T3 marque une autre chute de charge et un fort changement de pente, il est montré en post-traitement qu'une fissure au niveau du coin apparaît et elle est visualisée par l'interrogation des fibres optiques (avec des pics), voir FIGURE 8. On observe de plus que les niveaux de déformation des fibres en face inférieure et supérieure correspondent et renforce l'hypothèse plan des chargements choisis.

A 120 kN (T-F1), le premier vérin a été maintenu à force constante (voir FIGURE 6). Le mouvement du premier vérin a créé un mouvement du second vérin car la rotule le permettait (voir FIGURE 6). En conséquence, T-F1 est pris comme niveau de référence du déplacement du second vérin (courbe **noire**). Les changements de rigidité sont observés. Au temps T4, une perte de 10 kN est observée, ce qui marque le début et la propagation d'une deuxième fissure principale dans l'éprouvette.

A la fin de l'essai (temps TF), l'ouverture franche de la fissure s'est produite provoquant une forte perte de rigidité du spécimen. On l'observe au niveau des fibres où les pics représentant les fissures sont généralisés (voir FIGURE 9): au niveau de la première fissure près du coin, elle s'est encore agrandie. Au niveau de l'épaisseur, la grande fissure (voir **Erreur! Source du renvoi introuvable.(b)**) est accompagnée de fissures internes repérées avec les fibres optiques.

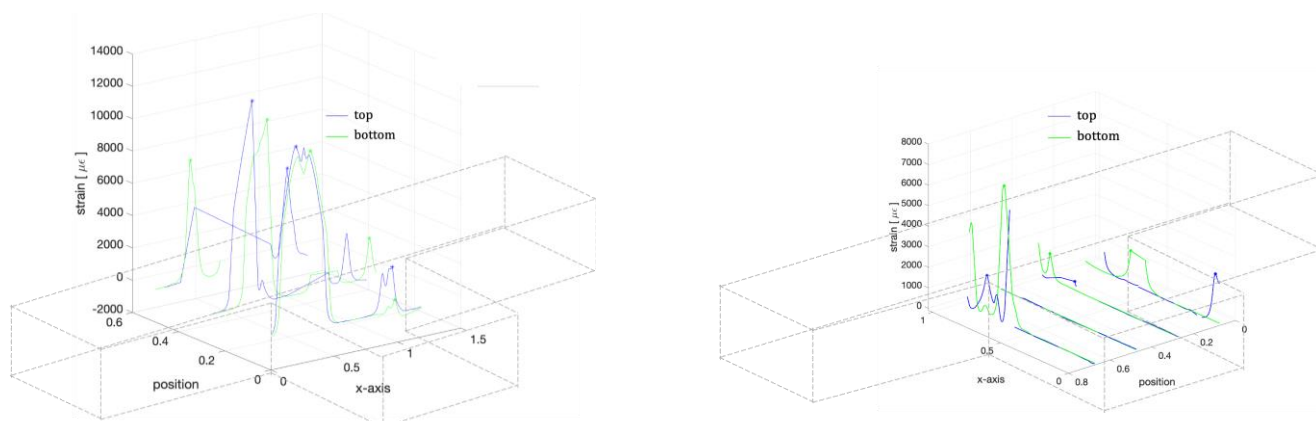


FIGURE 9. Déformations dans le corbeau à la fin de l'essai, fibres dans le poteau (a) et fibres dans la console (b)

La corrélation d'images montre un résidu de corrélation (voir FIGURE 10), représentant un saut dans le champ déplacement par rapport à l'image de référence. Il s'agit d'un bon indicateur de localisation de fissures et représente nettement un faciès précis.

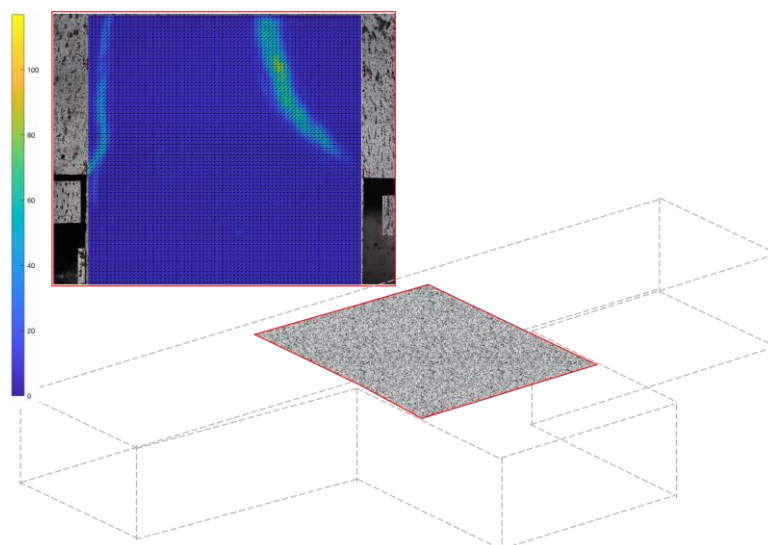


FIGURE 10. Résidu de corrélation entre l'image finale de l'essai et la référence

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'ensemble du travail consiste à réaliser un essai complexe sur du béton. Il a pour intérêt d'étudier le comportement de structures aussi massives où la conception des armatures se fait généralement par la méthode des bielles-tirants. L'instrumentation choisie a permis de suivre en temps réel les déformations de la structure étudiée. Les fibres optiques ont donné des informations sur les déformations internes de la structure et sur l'apparition des premières fissures. La corrélation d'images a également fourni une vue globale de l'éprouvette avec l'évolution temporelle des champs de déplacement et de déformation. Les premiers résultats permettent d'obtenir des champs de déformations propres dérivés des champs de déplacement. Cet essai correspond alors à une base fiable de validation expérimentale des méthodes de dimensionnement de structures massives sous chargements complexes. L'objectif de l'essai décrit est

de comprendre comment l'état d'endommagement à la fin du premier chargement F1 affecte la distribution des bielles et aussi des tirants qui influencent le dimensionnement des armatures.

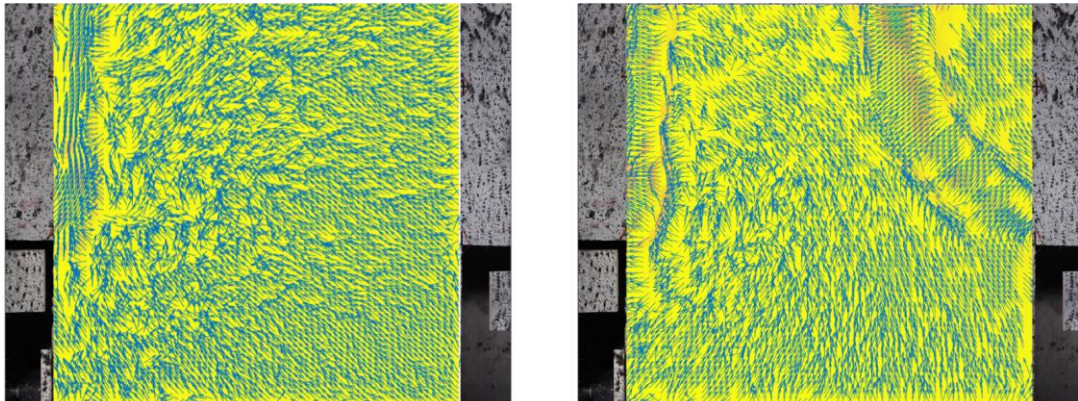


FIGURE 11. Direction principale minimale de déformation au niveau du corbeau à la fin de F1 (a) et à la fin de l'essai (b)

La direction principale minimale de déformation (voir FIGURE 11) correspondant au composant compression est représenté. Avec les analyses pour déterminer le treillis équivalent en bielles et tirants, ce résultat montrant les champs de compression est utilisé pour déterminer en premier les bielles. Cependant, on observe qu'en fonction du chargement (ici juste avec F1 puis avec F2), les deux champs diffèrent, ce qui était prévisible. L'état à partir duquel on choisit le treillis équivalent, dans les calculs d'ingénierie ne se basent que jusqu'à un comportement élastique. Cela remet en question le choix du modèle de bielles-tirants au-delà du domaine élastique mais aussi l'impact de ce choix dans la résistance de la structure.

Les prochains essais compris dans cette campagne permettront de confirmer ces premières conclusions. Ils mettront en évidence l'influence de l'historique de chargement dans les directions principales de déformation et dans ce sens le modèle bielles-tirants.

V. RÉFÉRENCES

- (fib), I. F. (2012). *Model code - Bulletin N65*.
- Bosc, J.-L. (s.d.). *Dimensionnement des constructions selon l'Eurocode 2 à l'aide des modèles Bielles et Tirants*. Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées.
- Chavez, G. M. (2015). *Approche semi-automatique de génération de modèles bielles-et-tirants*.
- EN1992-1-1, N. (s.d.). *Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1: règles générales et règles pour les bâtiments - Section 6 : Dimensionnement à l'aide de modèles bielles-tirants*.
- Hild, F., & Roux, S. (2012). Comparison of local and global approaches to digital image correlation. *Experimental mechanics*.
- Hsu, T., & Mo, Y. (2010). *Unified theory of concrete structures*. Houston: Wiley.
- J. Schlaich, K. S. (1987). *Toward a consistent design of structural concrete*. PCI Journal.
- Liang, Q. Q. (2000). Topology Optimization of Strut-and-Tie Models in Reinforced Concrete Structures Using an Evolutionary Procedure. *Aci Structural Journal*, 97(2), 322-332.
- Mörsch, E. (1902). *Der Eisenbetonbau, seine Anwendung und Theorie*. New York: Me Graw-Hill.
- Mihaylov, B. I., Hannewald, P., & Beyer, K. (2016). Three-Parameter Kinematic Theory for Shear-Dominated Reinforced Concrete Walls. *Journal of Structural Engineering*, 142.
- PRC-445, A. (s.d.). *2-21: Strut-and-Tie Method Guidelines for ACI 318-19 - Guide*.
- Ritter, W. (1899). *Die Bauweise Hennebique* (Vol. V33 vcl). Zürich: Schweizerische Bauzeitung.
- Schlaich, J. (1987). *Toward a consistent design of structural concrete*. PCI Journal.