

Quantification de la propagation de fissure à partir de la corrélation d'images volumiques pour un essai d'enfoncement de coin *in situ* sur mortier

Samy DRAY^{1,2}, Amelie FAU¹, Thomas WICK^{2,1}, François HILD¹

¹ Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France

² Leibniz University Hanover, Institute of Applied Mathematics, Hanover, Germany

RESUME La propagation de fissures dans le béton par chargement mécanique, vieillissement, séchage ou encore sous hautes températures occupe une place centrale dans les recherches en génie civil. Cette étude est basée sur l'analyse d'une propagation stable de fissure via un essai *in situ* d'enfoncement de coin sur mortier. On peut ainsi imager le matériau pour différents états de propagation en réalisant des acquisitions tomographiques aux rayons X. Par corrélation d'images volumiques régularisée appliquée sur chaque volume reconstruit, on peut mesurer les champs de déplacements internes de l'éprouvette durant toute la fissuration. La fissure principale a pu ainsi être quantifiée par les champs de déplacement et les résidus de corrélation.

Mots-clefs Corrélation d'images volumiques, Essai d'enfoncement de coin, Fissuration, Tomographie aux rayons X.

I. INTRODUCTION

A. Contexte

La tenue du béton ainsi que son étanchéité jouent un rôle majeur dans l'étude de la durabilité des structures du génie civil. La fissuration des matériaux cimentaires est un des effets majeurs qui pourraient engendrer des désastres humains et écologiques. Il est donc important d'être capable de prévoir précisément la fissuration avec des modèles de plus en plus précis. L'objectif de cette étude est de suivre l'évolution de la fissuration au sein d'un mortier par l'utilisation de la corrélation d'images volumiques appliquée à des scans tomographiques acquis lors d'un essai *in situ* d'enfoncement de coin.

B. Essai d'enfoncement de coin

Il existe de nombreuses méthodes pour étudier la fissuration du béton. Par exemple, les essais de flexion 3 points ou 4 points sont couramment utilisés en génie civil. Cependant, ils induisent généralement des phases de propagation instable des fissures. Brühwiler et Wittmann (1990) ont proposé un essai permettant d'obtenir une propagation stable, même pour des matériaux fragiles, appelé essai d'enfoncement de coin (EEC ou *Wedge Splitting Test*). Ce type d'essai, schématisé en [FIGURE 1](#), consiste à générer une fissuration stable au sein du matériau en

contrôlant directement son ouverture (déplacements horizontaux δ_H). Les déplacements horizontaux sont générés par le déplacement vertical appliqué δ_V sur le coin ayant un angle α .

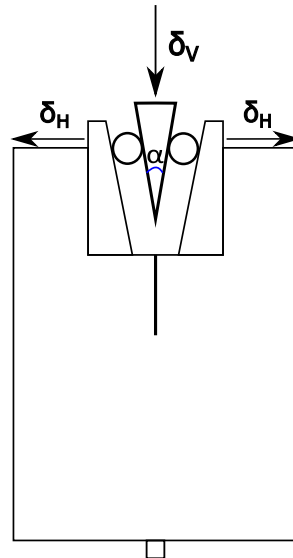


FIGURE 1. Schéma d'un essai d'enfoncement de coin

Le principal intérêt de cet essai est lié à la propagation stable de la fissure principale, ce qui permet de réaliser des observations tomographiques au cours du chargement. La corrélation d'images 2D a déjà été appliquée sur des EEC sur des bétons réfractaires (Vargas et al. 2016, 2018, 2019) et sur des essais cycliques avec un béton hautes performances (Suchorzewski et al., 2020). Bakour et al. (2022) ont combiné corrélation d'images et émission acoustique pour un EEC sur béton. La corrélation d'images volumiques a permis à Vargas et al. (2023) d'identifier les paramètres d'un modèle de zone cohésive. Cependant, ce genre d'analyse reste encore très rare.

Un autre avantage des EEC est qu'ils sont théoriquement applicables à n'importe quelle forme et taille d'éprouvette (Brühwiler et Wittmann, 1990). On peut alors analyser des éprouvettes parallélépipédiques de tailles métrique (Bakour et al., 2022) ou décimétrique (Vargas et al., 2016). Dans le cas présent, on a choisi une forme cylindrique pour améliorer la qualité des scans tomographiques. Des acquisitions tomographiques ont été réalisées par Skarzyński et Suchorzewski (2018) avant et après un EEC. Un inconvénient avec une éprouvette cylindrique est le risque de déviation de fissure comme décrit par Brühwiler et Wittmann (1990) et étudié par Neuner et al. (2022). Il a ainsi été décidé de modifier la forme de la pré-entaille en chevron pour favoriser la propagation sans déviation majeure.

C. Corrélation d'images volumiques

La corrélation d'images consiste à appairer deux images (ou volumes) acquis(e)s en cours d'essai. Pour l'exploitation des scans tomographiques, la corrélation d'images volumiques (CIV) sera mise en œuvre (Roux et al., 2008). On note f le volume de référence et g le volume dans un état déformé de l'éprouvette au cours d'un essai in situ (Sutton, 2013), \underline{x} le vecteur qui définit la position de chaque voxel. $f(\underline{x})$ et $g(\underline{x})$ sont alors les niveaux de gris (valeurs comprises entre 0 et 255 dans le cas présent) du voxel à la position \underline{x} , respectivement pour les volumes de référence et

déformé. Ce qui différencie les états de référence et déformé est le champ de déplacement \underline{u} qui résulte du chargement appliqué. La loi de conservation de niveaux de gris, principe sous-jacent de la corrélation d'images (Hild et Roux, 2012, Sutton 2013), s'écrit

$$\forall \underline{x} \in ROI, \quad f(\underline{x}) \approx g(\underline{x} + \underline{u}(\underline{x})) \quad (1)$$

Cette égalité est cependant une approximation car il y aura toujours des bruits et perturbations dues à l'acquisition. La relation précédente devient

$$\forall \underline{x} \in ROI, \quad f(\underline{x}) = g(\underline{x} + \underline{u}(\underline{x})) + \eta(\underline{x}) \quad (2)$$

où $\eta(\underline{x})$ correspond au bruit d'acquisition. Le champ de déplacement \underline{u} est à déterminer à partir de cette équation. Pour cela, il s'agit de minimiser le résidu global T_{CIV}

$$\forall \underline{u} \in V_u, \quad T_{CIV}(\underline{u}) = \sum_{\underline{x} \in ROI} (f(\underline{x}) - g(\underline{x} + \underline{u}(\underline{x})))^2 \quad (3)$$

avec V_u l'espace des champs de déplacements tests, et ROI le domaine définissant la région d'intérêt. Le champ de déplacement \underline{u}_{sol} est la solution du problème de minimisation

$$\underline{u}_{sol} = \arg \left(\min_{\underline{u} \in V_u} (T_{CIV}(\underline{u})) \right) \quad (4)$$

Il existe plusieurs façons de paramétriser ce problème. Celle qui nous intéresse est appelée méthode globale utilisant un maillage éléments finis (Roux et al., 2008). On considère alors un maillage contenant $N/3$ nœuds qui englobe la région d'intérêt. Le champ de déplacement est approximé par des fonctions de forme $\Psi_i(\underline{x})$ et les déplacements nodaux u_i avec $i \in [1, N]$ deviennent les inconnues à déterminer

$$\forall \underline{x} \in ROI, \quad \underline{u}(\underline{x}) = \sum_{i=1}^N \Psi_i(\underline{x}) u_i \quad (5)$$

Afin de favoriser la convergence des résultats, on applique une régularisation mécanique (Mendoza et al., 2019) dans le schéma de minimisation. Il en résulte des résidus mécaniques issus des équations d'équilibre du système. On introduit alors une longueur de régularisation ℓ exprimée en voxels pour la corrélation d'images volumiques (CIV), qui sert à donner un poids plus ou moins important au terme de pénalisation.

II. Essai d'enfoncement de coin

A. Réalisation de l'essai

L'essai d'enfoncement de coin a été réalisé sur une éprouvette de mortier cylindrique ayant un diamètre de 70 mm et une hauteur de 100 mm. Le matériau choisi est composé d'un ciment CEM II/A-LL 42.5 R et d'un sable venant de la Carrière du Boulonnais (Malbois, 2019). Afin d'obtenir un matériau ayant un bon contraste d'absorption des rayons X, tout en étant relativement homogène, une granulométrie du sable comprise entre 0,08 mm et 1,6 mm a été choisie. Le rapport E/C était de 0,5. Les éprouvettes fabriquées ont été placées en cure dans de l'eau ionisée à température ambiante pendant 28 jours. Afin de favoriser une propagation plane de la fissure, un chevron a été usiné le long du chemin anticipé de propagation. L'EEC a été

réalisé dans un tomographe à rayons X (FIGURE 2). L'éprouvette a été enveloppée d'un film cellophane pour éviter la fissuration induite par le séchage.

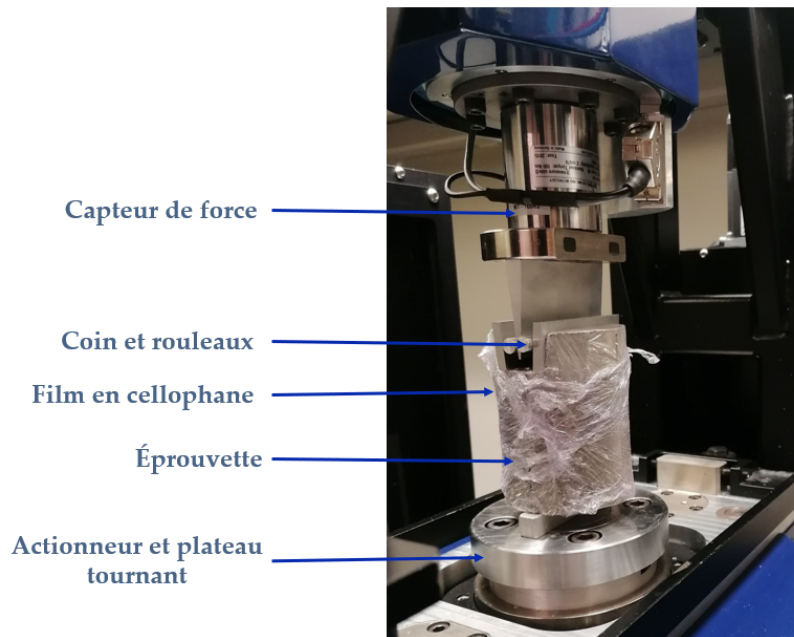


FIGURE 2 : Montage de l'essai *in situ* d'enfoncement de coin

Une précharge de 30 N a été appliquée et deux scans ont été acquis (scans 0 et 00) pour pouvoir quantifier les incertitudes de mesure. Puis un déplacement vertical a été imposé au coin à une vitesse de 3 $\mu\text{m/s}$. Le chargement a été stoppé à plusieurs instants pour réaliser des scans tomographiques (FIGURE 3). Un premier scan a été réalisé sans fissuration (scan 1). On a ensuite observé un pic d'effort autour de 100 N (scan 2). Vint ensuite la partie adoucissante induite par la propagation de fissure (scans 2 à 7). Enfin, une décharge a été appliquée pour pouvoir observer l'effet de refermeture de fissure (scan 8). On a observé une relaxation de l'effort appliqué lors du maintien du déplacement de la traverse de la machine. C'est pourquoi chaque scan a été lancé après 5 minutes de pause. Cela permet de limiter les mouvements parasites de l'éprouvette durant l'acquisition tomographique. On remarque aussi sur la FIGURE 3 que le niveau des efforts est resté très faible. A partir de cette courbe, on peut estimer une énergie de fissuration de 20 J/m^2 , ce qui confirme l'hypothèse que le matériau a une résistance plus proche de la pâte de ciment que d'un mortier car composé d'un sable fin. Les images reconstruites ont un volume utile de l'ordre de $500 \times 500 \times 700$ voxels, où la taille physique d'un voxel est de 150 μm .

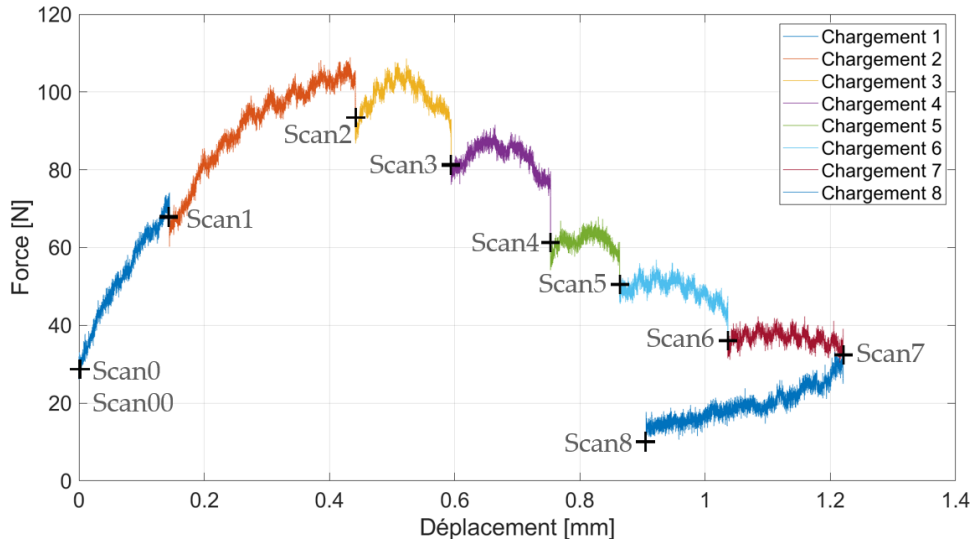


FIGURE 3 : Evolution de l'effort mesuré en fonction du déplacement imposé au cours de l'essai *in situ* d'enfoncement de coin

B. Quantification des incertitudes

Les incertitudes de mesure sont déterminées en effectuant une CIV entre les scans 0 et 00. On obtient une incertitude type sur les déplacements de 0,07 voxel dans la direction d'ouverture de fissure x , de 0,03 voxel dans la direction verticale z et de 0,05 voxel dans la direction y (soit des incertitudes en déplacement de l'ordre de 10 μm).

C. Résultats de CIV

En utilisant le scan 0 comme référence (FIGURE 3), on applique la CIV pour analyser les états de chargement (scans 1 à 8) avec une longueur de régularisation de 30 voxels pour une taille moyenne d'élément de 20 voxels. On peut en particulier analyser les résidus de corrélation ρ définis par

$$\forall \underline{x} \in ROI, \rho(\underline{x}) = |f(\underline{x}) - g(\underline{x} + \underline{u}_{\text{sol}}(\underline{x}))| \quad (6)$$

Cette valeur de résidu permet de visualiser la surface fissurée, le champ de déplacement étant discontinu contrairement à l'hypothèse faite *a priori* sur le champ de déplacement mesuré. Ce champ de résidu est montré sur la FIGURE 4 pour le scan 3, qui correspond à l'amorçage de la fissure, et pour le scan 7 où la fissure a le plus propagé. Ainsi, on observe la forme de la surface fissurée pour le scan 7 avec une légère déviation qui apparaît proche du front dans la partie de l'éprouvette où il n'y a plus de chevron.

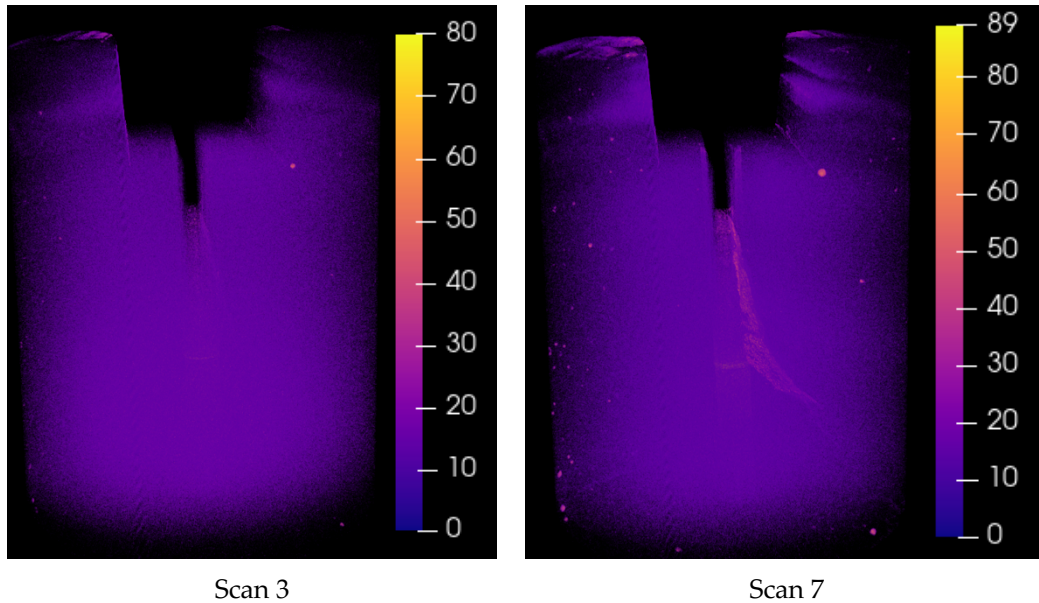
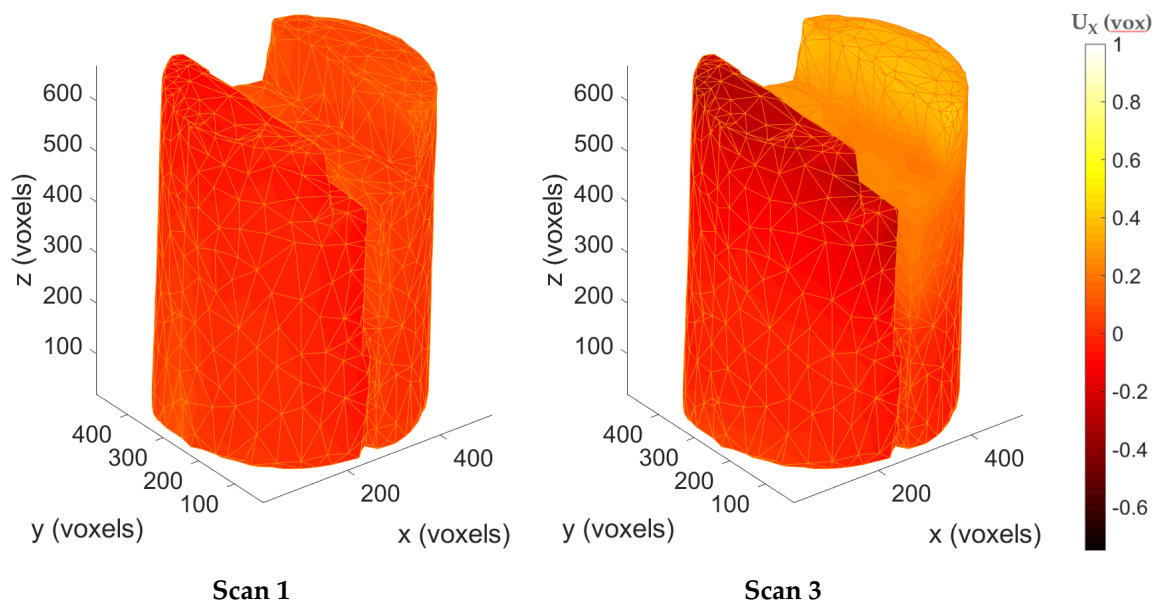


FIGURE 4 : Résidus de corrélation (en niveau de gris) résultant du calcul de CIV pour les scans 3 et 7

Les champs de déplacement dans la direction x , c'est-à-dire pour l'ouverture de la fissure en mode I, peuvent être observés en **FIGURE 5** pour les scans 1, 3, 5 et 7. On observe un fort gradient en déplacement entre les deux parties de l'éprouvette. Ces déplacements ont cependant une amplitude très faible (de l'ordre de ± 1 voxel, c'est-à-dire $\pm 150 \mu\text{m}$), ce qui montre la fragilité du matériau étudié. Malgré cela, l'EEC a pu être réalisé sans encombre avec une propagation de fissure stable. Les incertitudes de mesure étant de l'ordre de $10\mu\text{m}$, les quantifications obtenues par CIV sont significatives.



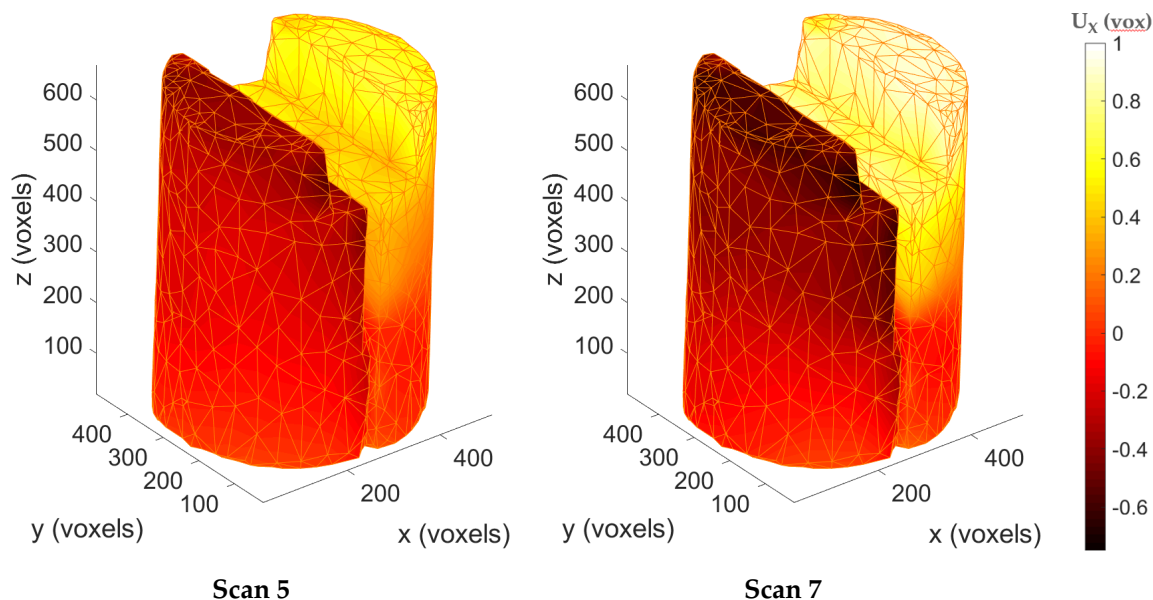


FIGURE 5 : Champs de déplacement dans la direction x (exprimé en voxel) obtenus par CIV pour les scans 1, 3, 5 et 7

A partir de ces résultats, on peut estimer l'ouverture de fissure au niveau de la zone d'amorçage. On extrait les sauts de déplacements au niveau de la pointe du chevron (points P_1 et P_2 , FIGURE 6) afin d'obtenir l'ouverture de fissure en modes I, II et III.

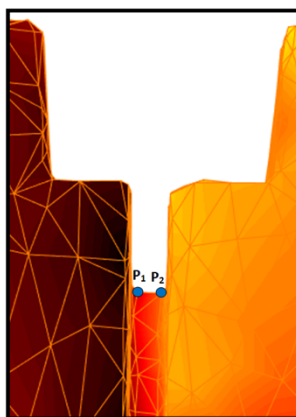


FIGURE 6 : Points d'extraction des déplacements pour la mesure des sauts de déplacement

Le TABLEAU 1 montre ces ouvertures de fissures pour tous les scans analysés. On observe une claire augmentation de la composante en mode I tout le long du chargement jusqu'à un effet de refermeture partielle à la décharge (de $71 \mu\text{m}$ à $53 \mu\text{m}$). On remarque également une ouverture en mode II (allant jusqu'à $39 \mu\text{m}$) de l'ordre de la moitié de celle en mode I. Ces niveaux sont non négligeables si on les compare aux incertitudes de mesure ($14 \mu\text{m}$). En revanche, on ne note pas d'effet similaire pour le mode III dont les sauts de déplacement restent inférieurs aux incertitudes de mesure. De par la faiblesse des efforts appliqués, des effets de frottement entre les pièces du montage (FIGURE 2) et de petits désalignements ont pu générer cette mixité modale.

Ouverture de fissure	Scan 1	Scan 2	Scan 3	Scan 4	Scan 5	Scan 6	Scan 7	Scan 8
Mode I	0,02 vx 3 μm	0,11 vx 17 μm	0,17 vx 26 μm	0,24 vx 37 μm	0,30 vx 46 μm	0,40 vx 62 μm	0,46 vx 71 μm	0,34 vx 53 μm
Mode II	0.01 vx 2. μm	0.03 vx 5 μm	0.12 vx 18 μm	0.16 vx 23 μm	0.19 vx 28 μm	0.23 vx 35 μm	0.26 vx 39 μm	0.19 vx 29 μm
Mode III	0.01 vx 0.7 μm	0.01 vx 1.5 μm	0.047 vx 7 μm	0.02 vx 3 μm	0.03 vx 5 μm	0.07 vx 10 μm	0.04 vx 6 μm	-0.04 vx -5 μm

TABLEAU 1 : Ouverture de fissure en modes I, II et III en fonction du pas de chargement

III. Conclusion

La formulation de mortier choisie offre de bonnes propriétés de contraste pour la tomographie aux rayons X mais conduit à un matériau très fragile. Une fissuration fine a cependant pu être quantifiée grâce à un essai *in situ* d'enfoncement de coin. La corrélation d'images volumiques avec régularisation mécanique a permis de mesurer les champs de déplacement 3D qui ont des amplitudes maximales d'un voxel (150 μm) avec une incertitude inférieure au dixième de voxel (10 μm). Les résidus de corrélation permettent de localiser la fissure principale. Celle-ci a une ouverture en mode I, qui est prédominant, de quelques dizaines de micromètres. On a également pu observer que les éventuels mésalignements et le frottement entre pièces du montage ont engendré une ouverture en mode II. Par contre, l'ouverture en mode III est restée inférieure aux incertitudes de mesure.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du programme « Investissements d'Avenir » à travers le projet « ADI 2021 » financé par l'IDEX Paris-Saclay, ANR-11- IDEX-0003-02 et « MATMECA » (ANR-10-EQPX-37). Le soutien financier de l'Université franco-allemande à travers le Collège doctoral franco-allemand "Approches numériques et expérimentales avancées" (CDFA-DFDK 19-04) est également à noter. Enfin, ces travaux ont bénéficié de discussions scientifiques au sein de l'*International Research Training Group* sur les Techniques de Mécaniques Numérique en Grandes Dimension (IRTG 2657) financé par la Fondation Allemande pour la Recherche (DFG, subvention 433082294).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A. Bakour, M. B. Ftima, A. Chérueil (2022), Combination of acoustic emission and digital image correlation monitoring for wedge splitting tests on large concrete specimens. *Construction and Building Materials* 322: 126496
- E. Brühwiler and F. H. Wittmann (1990), The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests. *Engineering fracture mechanics* 35.1-3: 117-125

- F. Hild and S. Roux (2012), Digital Image Correlation dans *Optical Methods for Solid Mechanics. A full-field approach*: 183-228
- A. Mendoza, J. Neggers, F. Hild, S. Roux (2019), Complete Mechanical Regularization Applied to Digital Image and Volume Correlation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 355: 27-43
- S. Roux, F. Hild, P. Viot, D. Bernard (2008) Three-dimensional image correlation from X-ray computed tomography of solid foam. *Composites Part A: Applied science and manufacturing* 39.8: 1253-1265
- J. Suchorzewski, M. Prieto, U. Mueller (2020), An experimental study of self-sensing concrete enhanced with multi-wall carbon nanotubes in wedge splitting test and DIC. *Construction and Building Materials* 262: 120871
- Ł. Skarżyński, J. Suchorzewski (2018), Mechanical and fracture properties of concrete reinforced with recycled and industrial steel fibers using Digital Image Correlation technique and X-ray micro computed tomography. *Construction and Building Materials* 183: 283-299
- M. Sutton (2013). Computer Vision-Based, Noncontacting Deformation Measurements in Mechanics: A Generational Transformation. *Applied Mechanics Reviews* 65.5
- M. Malbois (2019). Analyse multi-échelle des déformations différées dans les matériaux cimentaires sous dessiccation ou réaction sulfatique interne. Thèse de Doctorat, *Université Paris-Saclay*
- M. Neuner, S. Smaniotto, G. Hofstetter (2022), A modified wedge splitting test for susceptible quasi-brittle materials. *Construction and Building Materials* 326: 126733
- R. Vargas, J. Neggers, R. Canto, J. Rodrigues, F. Hild (2016) Analysis of wedge splitting test on refractory castable via integrated DIC. *Journal of the European Ceramic Society* 36.16: 4309-4317
- R Vargas, J. Neggers, R Canto, J. Rodrigues, F. Hild (2018) Comparison of two full-field identification methods for the wedge splitting test on a refractory. *Journal of the European Ceramic Society* 38.16: 5569-5579
- R Vargas, J. Neggers, R Canto, J. Rodrigues, F. Hild (2019) Analysis of a castable refractory using the wedge splitting test and cohesive zone model. *Journal of the European Ceramic Society* 39.13: 3903-3914
- R. Vargas, R.B. Canto, B. Smaniotto, F. Hild, Calibration of cohesive parameters for a castable refractory using 4D tomographic data and realistic crack path from in-situ wedge splitting test. *Journal of the European Ceramic Society* 43.2: 676-691