



HAL
open science

Analyse par corrélation d'images d'essais d'impact sur poutres en Béton Armé

Benoit Lombard, Fabrice Gatuingt

► **To cite this version:**

Benoit Lombard, Fabrice Gatuingt. Analyse par corrélation d'images d'essais d'impact sur poutres en Béton Armé. 31èmes Rencontres de l'AUGC, May 2013, Cachan, France. hal-01623756

HAL Id: hal-01623756

<https://hal.science/hal-01623756>

Submitted on 25 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse par corrélation d'images d'essais d'impact sur poutres en Béton Armé

Lombard Benoit ¹, Gatuingt Fabrice ¹

¹ LMT-Cachan (ENS Cachan/CNRS/Université Paris 6/PRES UniverSud Paris)
61 avenue du Pt Wilson, 94235 CACHAN Cedex
fabrice.gatuingt@ens-cachan.fr

RÉSUMÉ. Les développements récents autour de la corrélation d'image, associés à des caméras rapides numériques de plus en plus performantes et accessibles permettent d'envisager de nouveaux moyens de mesures pour des essais dynamiques. Ce papier présente donc le dépouillement d'essais d'impact sur poutre en béton armé à l'aide de la corrélation d'images numériques afin de déterminer les champs de déplacement lors de l'essai et également de déterminer la vitesse de fissuration du béton armé. La connaissance de ces données au cours du temps est ainsi un allié essentiel au modélisateur pour permettre une meilleure validation des modèles numériques.

ABSTRACT. Recent developments in digital image correlation associated with high-speed digital cameras more efficient and affordable can allow new measures for dynamic tests. The work presented in this paper presents new experimental test data on impacted reinforced concrete beam. The technique uses digital image correlation to determine the displacement fields and also the concrete crack speed during the test. The knowledge of these data during the time is an important point for the modeler to allow a better validation of numerical models.

MOTS-CLÉS : essai impact, béton armé, corrélation images numérique, vitesse de fissuration

KEYWORDS: impact tests, reinforced concrete, digital image correlation, crack speed

1. Introduction

Les structures en béton armé telles que les ponts, les entrepôts de stockage, les installations nucléaires peuvent être soumises à des chargements dynamiques importants tels que des impacts ou des explosions accidentelles. La problématique industrielle est alors de pouvoir évaluer la tenue de ces structures en béton armé sous chargement dynamique de type choc à basse vitesse, comme la chute accidentelle de colis ou la chute d'avion. Ainsi pour réaliser leur conception et leur analyse, il est important de bien maîtriser la réponse à un chargement dynamique du béton. Plusieurs modèles macroscopiques du béton ont été développés [OTT 79, SLU 92, DUB 96, SER 98, BAZ 00, GAT 02, PED 08, GAT 08, DES 10] pour effectuer l'analyse non linéaire numérique de ces problèmes. Néanmoins, un modèle de comportement n'est pertinent que dans la mesure où il est capable de donner des résultats prédictifs auxquels on peut accorder une certaine confiance. Dans cette optique, la démarche classique est de confronter des résultats de calculs aux résultats expérimentaux pour évaluer la fiabilité d'un modèle. Cependant les essais présents dans la littérature et généralement utilisés pour la validation ne sont pas tous suffisamment instrumentés ou suffisamment documentés. C'est pourquoi, dans le cadre des travaux de thèse de M. Chambart [CHA 09] et A. Leroux [LER 12] nous avons réalisé, en collaboration avec le CEA Saclay et EDF R&D, des essais d'impact sur des poutres en béton armé. Ces essais ont été instrumentés de deux caméras rapides en plus des mesures habituelles de déformation, de vitesse du projectile et de la force d'impact. L'objet du travail présenté ici est l'analyse par corrélation d'images de ces essais.

2. Expérimentation d'impact sur poutres en béton armé

Nous rappelons ici de façon succincte le dispositif expérimental utilisé lors des différentes campagnes expérimentales [CHA 09, LER 12].

Les essais d'impact ont été réalisés sur la tour de chute Orion (Figure 1) du Laboratoire d'études Dynamiques du CEA Saclay (DYN). Cette tour de chute gravitaire guidée permet de lâcher un projectile d'une masse maximale de 900 kg et d'une hauteur allant jusqu'à 8 m, ce qui permet d'atteindre une vitesse d'impact d'environ 12,5 m/s. Ce projectile est guidé par 4 rails afin qu'il tombe et rebondisse verticalement.

Différents projectiles sont utilisables avec des masses et des matériaux divers. Le projectile est constitué d'un corps sur lequel une tête interchangeable en acier peut être fixée. Lors de nos campagnes expérimentales avec des chocs mous, aucune tête n'a été mise en place, mais un cube de nid d'abeille a été posé sur la zone d'impact, entre le projectile de 311 kg et la poutre. Le projectile a été lâché d'une hauteur de 1,5 m, soit une vitesse d'impact de 5,4 m/s. Pour les chocs durs, le projectile de 106 kg avec une tête rectangulaire a été lâché d'une hauteur de 3,5 m, soit une vitesse d'impact de 8,3 m/s.

La Figure 2 présente le dispositif de supportage utilisé lors de ces campagnes. Les appuis sont réalisés de manière à permettre la rotation de la poutre tout en empê-

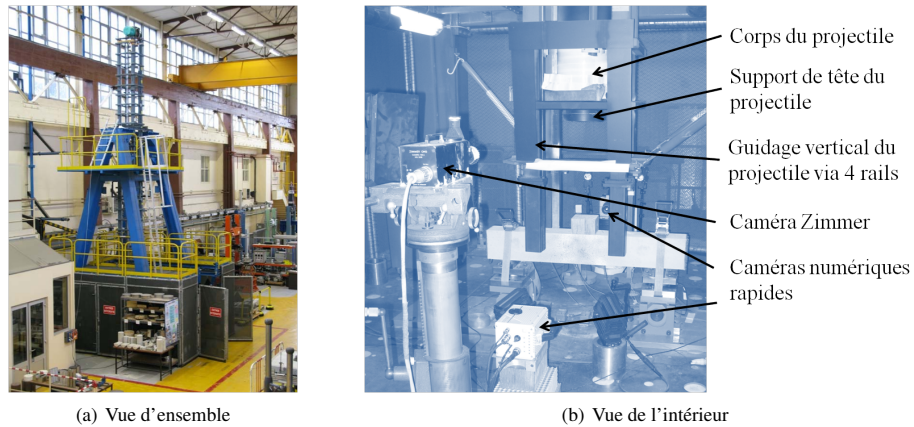


Figure 1. *Tour de chute Orion et dispositif expérimental*

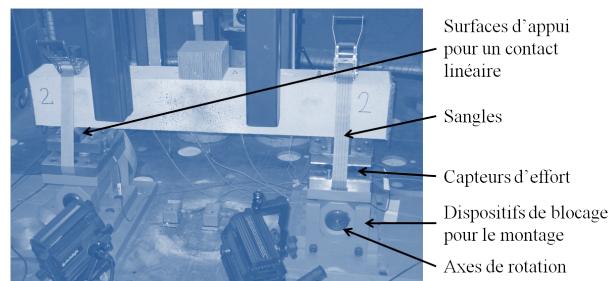


Figure 2. *Dispositif de supportage des poutres*

chant son décollement, via une précharge comprise entre 7 et 8 kN générée par des sangles. Ces appuis, de forme arrondie (contact quasi-linéique), sont fixés au sol sur une plaque et sont modulables, ce qui permet de faire varier la longueur entre appuis. Les poutres testées auront donc une longueur entre appuis égale à 1, 1,5 et 3m. Les résultats présentés par la suite sont ceux obtenus sur les poutres de 3m.

3. Corrélation d'images numériques

Lors des simulations numériques d'essais sur matériaux et/ou structures, il est d'usage courant de travailler à partir des champs de déplacements et de déformations. Il devient alors intéressant de pouvoir développer des techniques expérimentales capables d'identifier ces champs, ce qui nous permettra *a posteriori* de valider un modèle (loi de comportement et modèle numérique) en le comparant plus précisément avec l'expérience.

Développé au LMT Cachan, le logiciel CORRELI_Q4 [BES 06] permet de déterminer les champs de déplacement par corrélation d'images et d'en déduire les champs de déformation. Deux images, où chaque pixel de ces images est codé en niveaux de gris, sont comparées à deux instants différents. Ces images sont discrétisées en "imagettes" (appelées zones d'étude centrée au point considéré) dont la taille $l \times l$ en pixel est déterminée par l'utilisateur. Le principe de la corrélation consiste alors à apparier le motif correspondant à la zone d'étude dans deux images afin de pouvoir déterminer le déplacement du centre de la zone (voir Figure 3). Il s'agit ainsi de rechercher dans l'image déformée l'endroit où on atteint le maximum de vraisemblance avec chaque zone d'étude considéré dans l'image de référence. Il est à noter que l'augmentation de la taille de la zone d'étude permet de diminuer le niveau d'incertitude du déplacement mesuré au détriment du nombre de points de mesures.

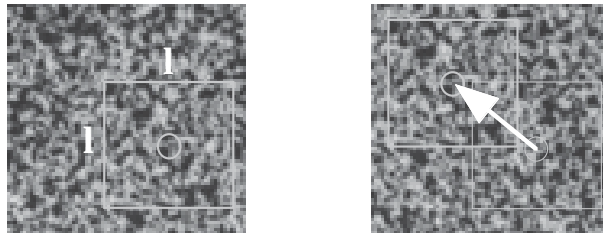


Figure 3. Zones d'étude sur une image de référence et sur une image "déformée".

Pour avoir des résultats satisfaisants via la corrélation d'images, la bonne qualité de l'image est importante avec un spectre en niveau de gris le plus large et le plus équilibré possible. Par défaut, la texture des poutres en béton armé étudiées ici ne couvrait qu'une partie du spectre en niveau de gris ce qui est généralement insuffisant pour obtenir des résultats satisfaisants. C'est donc la réalisation d'un mouchetis de peinture constitué d'un mélange de tâches de peinture noir et blanc aléatoirement réparti (d'un diamètre généralement compris entre 4 à 10 fois la taille d'un pixel), qui nous a permis d'élargir le spectre.

Etant donnée la durée d'un essai d'impact sur des poutres en béton (quelques centièmes de secondes), l'utilisation de deux caméras rapides du LMT Cachan a été rendu nécessaire (caméras IMAGER PHOTRON FASTCAM SA-5 N&B). L'une permet d'observer la propagation des fissures sur l'ensemble d'une face (sans mouchetis) de la poutre, tandis que l'autre caméra permet d'observer une zone restreinte de l'autre face avec mouchetis et notamment la propagation de la fissure centrale de la poutre (Figure 4). Ces caméras possèdent une fréquence d'acquisition maximale de 10^6 images par seconde. Cependant leur capacité de stockage est limitée et dépend de la durée de l'enregistrement, de la fréquence d'acquisition mais aussi de la dimension des images (en nombre de pixels). Un compromis a donc été trouvé pour les deux caméras. La caméra (avec mouchetis) a été paramétrée de telle façon à avoir une fréquence de 50 000 images par seconde et une taille d'image de 512×272 pixels, ce qui nous permet d'avoir un temps d'enregistrement confortable de 0,82 s. La taille d'image en pixels

correspond à une zone d'observation sur la poutre d'environ 100x57mm, soit une résolution approximative de 5 pixels par mm ou encore 127 dpi (pixels par pouce).

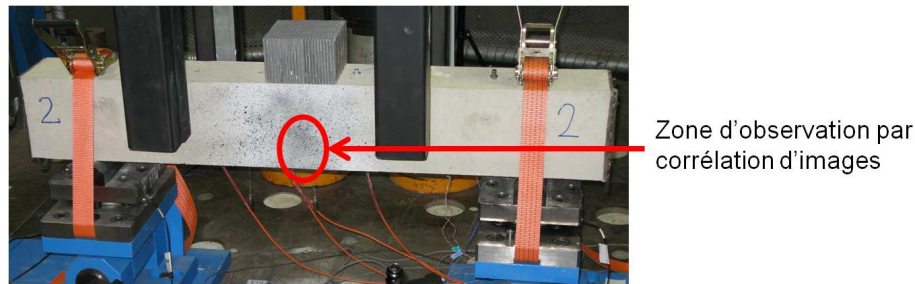


Figure 4. Zone d'intérêt pour la corrélation d'images numériques lors de l'étude de la vitesse de fissuration

4. Analyse des essais d'impact

4.1. Analyse globale

Grâce à la corrélation d'images, nous pouvons donc déterminer les champs de déplacement globaux de la poutre au cours du temps. Cette donnée nous permettra de valider ultérieurement des modèles de comportement du béton avec une information bien plus riche que les données expérimentales usuelles. La Figure 5 montre ainsi les différents champs de déplacement (horizontaux et verticaux) dans une poutre en béton armé soumise à un choc dur. Nous pouvons observer que le centre de la poutre, entre les deux fissures obliques se déplace plus que la partie à l'extérieure des fissures. Ceci correspond aux résultats attendus, puisque lors d'un choc dur un cône de cisaillement apparaît dans la poutre sous le projectile. La corrélation d'images permet d'obtenir une évolution de l'apparition de ce cône au cours du temps (non présentée ici) avec des données mesurables (vitesse de déplacement, ...), tandis que les mesures classiques ne permettent qu'une observation post-mortem de celui-ci.

4.2. Analyse de la fissuration

En raison des difficultés techniques, très peu de méthodes expérimentales ont été proposées dans la littérature pour étudier la vitesse de fissuration dynamique de structures en béton. Des études expérimentales effectuées sur des matériaux fragiles transparents ont montré une vitesse limite de $0,5C_R$ pour le verre [EDG 41], de $0,6C_R$ pour le plexiglas [DUL 60] et de $0,4C_R$ pour la Homalite-100 [RAV 84], C_R étant la vitesse des ondes de Rayleigh donnée par :

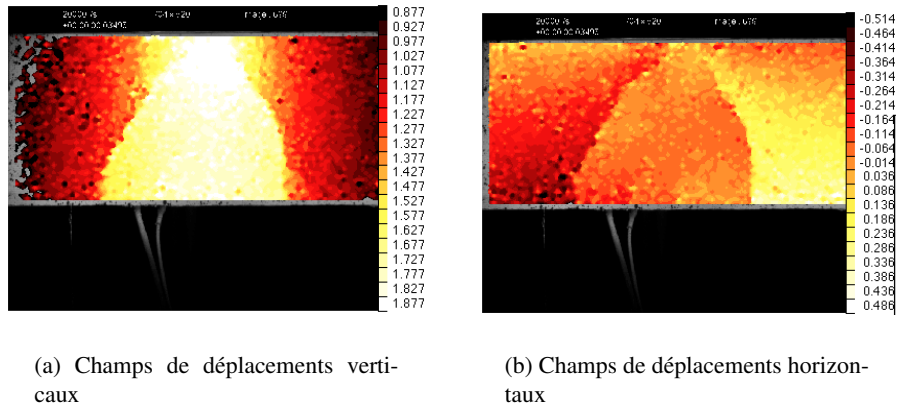


Figure 5. Champs de déplacements (en pixel) dans la poutre lors de l'essai de choc dur

$$C_R = \frac{0,862 + 1,14\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{E}{2(1 + \nu)\rho}} \quad [1]$$

où E , ρ , ν sont le module d'Young, la masse volumique et le coefficient de Poisson du matériau considéré ($C_R = 0,59\sqrt{E/\rho}$ pour $\nu = 0,2$). Une technique expérimentale a été proposée pour le béton par Gurbach *et al* [GUR 89] sur la base de l'utilisation de jauges de fissure, la vitesse de fissuration étant déduite par la variation de la résistance électrique au cours de la propagation de la fissure. Zhang *et al* [ZHA 10] ont effectué des essais de flexion trois points sur des poutres en BHP. La vitesse de fissuration maximale obtenue a été d'environ $0,2C_R$ (soit environ 400 m/s) pour une vitesse d'impact de 2,46 m/s ce qui est faible par rapport aux matériaux fragiles. Forquin [FOR 12] a obtenu des vitesses de fissuration pour du béton de 1300 m/s à partir d'essais de traction par écaillage qui impose une vitesse de déformation bien plus importante que lors des essais de flexion.

Dans notre étude nous avons utilisé deux extensions du logiciel Correli_Q4, Fissure_fit [ROU 06] et Fissure_fit enriched [MAT 12] qui permettent de détecter la position de la pointe de fissure. A partir de la position de la pointe de fissure à différents instants nous pouvons en déduire la vitesse de fissuration. Les résultats obtenus nous donne une vitesse de fissuration de l'ordre de 300 à 400 m/s pour une poutre en béton (courant) armé. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Zhang *et al* pour un BHP. Il semblerait donc que la vitesse de fissuration dépende du type de chargement – flexion ou traction "pure".

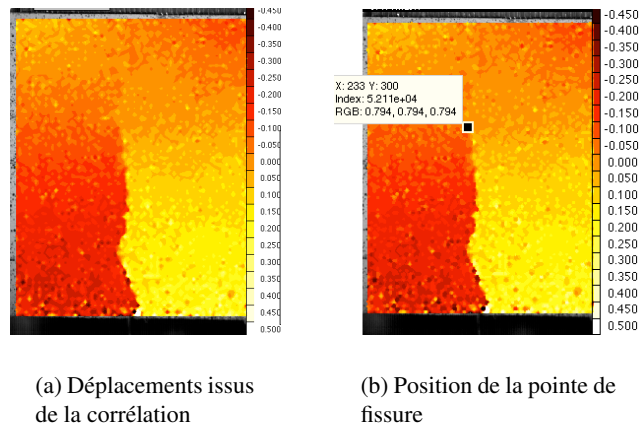


Figure 6. Repérage de la pointe de fissure

5. Conclusions

Les essais d'impact sur tour de chute présentés ici s'inscrivent dans une longue tradition d'essais d'impacts gravitaires. Néanmoins jusqu'à présent les résultats expérimentaux accessibles lors de ces essais étaient localisés aux emplacements où des capteurs avaient été disposés (accéléromètres, jauges de déformations, ...). Les développements récents autour de la corrélation d'images, associé à des caméras rapides numériques de plus en plus performantes et accessibles permettent d'envisager de nouveaux moyens de mesures. L'accès au champs de déplacement (plus ou moins global) au cours du temps est ainsi un allié essentiel au modélisateur pour permettre une meilleure validation des modèles numériques. De plus la détermination de données plus locales est toujours possible ce qui permet, dans le cas présent, d'avoir assez facilement accès à la vitesse de fissuration – donnée jusqu'à présent difficile à déterminer.

6. Bibliographie

- [BAZ 00] BAZANT Z., CANER F., ADLEY M., AKERS S., « Fracturing rate effect and creep in microplane model for dynamics », *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, vol. 126, n° 9, 2000, p. 962-970.
- [BES 06] BESNARD G., HILD F., ROUX S., « "Finite-element" displacement fields analysis from digital images : Application to Portevin-Le Châtelier bands. », *Experimental Mechanics*, vol. 46, 2006, p. 789-804.
- [CHA 09] CHAMBART M., « Endommagement anisotrope et comportement dynamique des structures en béton armé jusqu'à la ruine », PhD thesis, ENS Cachan, France, 2009.

- [DES 10] DESMORAT R., GATUINGT F., RAGUENEAU F., « Nonstandard Thermodynamics Framework for Robust Computations with Induced Anisotropic Damage. », *International Journal of Damage Mechanics*, vol. 19, 2010, p. 53-73.
- [DUB 96] DUBÉ J., PIJAUDIER-CABOT G., LA BORDERIE C., « Rate dependent damage model for concrete in dynamics », *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, vol. 122, n° 10, 1996, p. 939-947.
- [DUL 60] DULANEY E., BRACE W., « Velocity behavior of a growing crack », *J. Appl. Phys.*, vol. 31, 1960, p. 2233-2236.
- [EDG 41] EDGERTON H., BARSTOW F., « Further studies of glass fracture with high-speed photography », *J. Amer. Ceram. Society*, vol. 24, 1941, p. 131-137.
- [FOR 12] FORQUIN P., « An optical correlation technique for characterizing the crack velocity in concrete », *Eur. Phys. J. Special Topics*, vol. 206, 2012, p. 89-95.
- [GAT 02] GATUINGT F., PIJAUDIER-CABOT G., « Coupled damage and plasticity modelling in transient dynamic analysis of concrete », *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomec.*, vol. 26, 2002, p. 1-24.
- [GAT 08] GATUINGT F., DESMORAT R., CHAMBART M., COMBESURE D., GUILBAUD D., « Anisotropic 3D delay-damage model to simulate concrete structures. », *Revue Européenne de mécanique numérique*, vol. 17, 2008, p. 740-60.
- [GUR 89] GURBACH M., HEHN K.-H., EIBL J., « Measurement of crack velocity in concrete », *Experimental Techniques*, vol. 13, 1989, p. 25-27.
- [LER 12] LEROUX A., « Modèle multiaxial d'endommagement anisotrope : Gestion numérique de la rupture et application à la ruine de structures en béton armé sous impacts », PhD thesis, ENS Cachan, France, 2012.
- [MAT 12] MATHIEU F., HILD F., ROUX S., « Identification of a crack propagation law by digital image correlation. », *Int. J. of Fatigue*, vol. 36, 2012, p. 146-154.
- [OTT 79] OTTOSEN N., « Constitutive model for short-time loading of concrete », *Journal of the Engineering Mechanics Division-ASCE*, vol. 105, n° 1, 1979, p. 127-141.
- [PED 08] PEDERSEN R., SIMONE A., SLUYS L., « An analysis of dynamic fracture in concrete with a continuum visco-elastic visco-plastic damage model », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, 2008, p. 3782-805.
- [RAV 84] RAVI-CHANDAR K., KNAUSS W., « An experimental investigation into dynamic fracture : III. On steady-state crack propagation and crack branching », *International Journal of Fracture*, vol. 26, 1984, p. 141-154.
- [ROU 06] ROUX S., HILD F., « Stress intensity factor measurements from digital image correlation : post-processing and integrated approaches », *Int. J. of Fracture*, vol. 140, 2006, p. 141-157.
- [SER 98] SERCOMBE J., ULM F., TOUTLEMONDE F., « Viscous hardening plasticity for concrete in high-rate dynamics », *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, vol. 124, n° 9, 1998, p. 1050-1057.
- [SLU 92] SLUYS L., « Wave propagation, localisation and dispersion in softening solids », PhD thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 1992.
- [ZHA 10] ZHANG X., YUB R., RUIZ G., TARIFA M., CAMARA M., « Effect of loading rate on crack velocities in HSC », *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, 2010, p. 359-370.