

# Caractérisation des phénomènes de striction en dynamique ultra-rapide à l'aide d'une caméra unique

La compréhension physique des mécanismes de ruine (striction puis fragmentation d'un ensemble mécanique) implique la réalisation d'expériences élémentaires au cours desquelles les matériaux subissent de grandes déformations, pour différents types de géométrie et de trajets de chargement. Cet article illustre une telle situation dans le cas d'un cylindre en cuivre mis en expansion par explosif. Afin de caractériser le comportement de l'éprouvette, des systèmes d'imagerie ultra-rapide, grand champ et très résolus, analogiques aujourd'hui mais en mutation vers des solutions « tout numérique », sont mis en œuvre. Nous décrivons ici l'accès à l'évolution de l'état de surface au cours du temps par la mise en place d'un système d'acquisitions stéréoscopiques en insistant sur les spécificités liées à la très haute cadence des prises de vue, aux grandes déformations des objets analysés et au contexte pyrotechnique.

G. Besnard • J.-M. Lagrange CEA - DAM Île-de-France  
 F. Hild • S. Roux LMT-Cachan, ENS Cachan / CNRS / UPMC, UniverSud Paris, Cachan  
 C. Voltz CEA - Valduc

Pour les applications en détonique où les objets subissent de grandes déformations (parfois au-delà de 100%) pendant des temps très courts (moins de 100  $\mu$ s), la cinématographie ultra-rapide est un moyen incontournable. La mise en place d'un système stéréoscopique permet, de plus, d'accéder à des informations tridimensionnelles liées à l'état de surface, grandeurs qui nous intéressent tout particulièrement dans le cadre de la caractérisation de la striction. En couplant la stéréovision avec la corrélation d'images numériques [1], grâce au recours à un marquage de type « mouchetis » de la surface de l'objet étudié, l'objectif est de fournir, par une analyse automatisée, une caractérisation de la qualité de la surface au cours du temps ainsi que les temps d'apparition des localisations de déformation. Tous les principes des techniques précitées ainsi que les éléments de caractérisation complète de nos chaînes optiques (distorsion, résolution) sont décrits

en détail dans [2,3]. Nous nous concentrons sur leur déclinaison à des expériences de détonique en analysant plus particulièrement l'implantation sur dalle de tir des mesures, la problématique de l'étalonnage stéréoscopique ainsi que l'association univoque, spatiale et temporelle, préalable à la reconstruction 3D.

## Spécificité de la reconstruction de surfaces de matériaux déformés par explosif

Comme illustré sur la figure 1, un système stéréoscopique réside dans l'observation d'une scène selon différents angles de vue. Pour nos applications, compte tenu des fortes cadences d'acquisition (de l'ordre du demi-million d'images par seconde pour l'exemple traité), du champ et de la définition nécessaires (impliquant des images de taille 1 200 x 1 200 pixels), nous avons opté pour l'utilisation de caméras analogiques basées sur l'utilisation d'un miroir

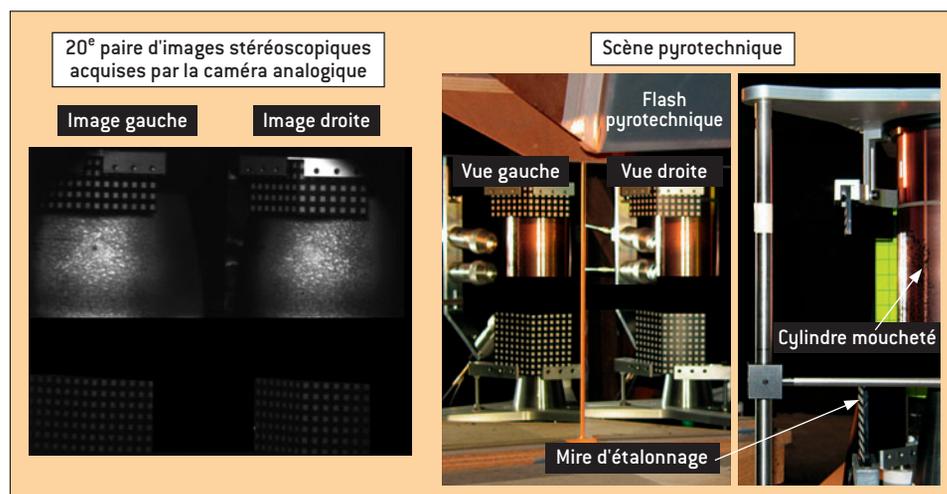
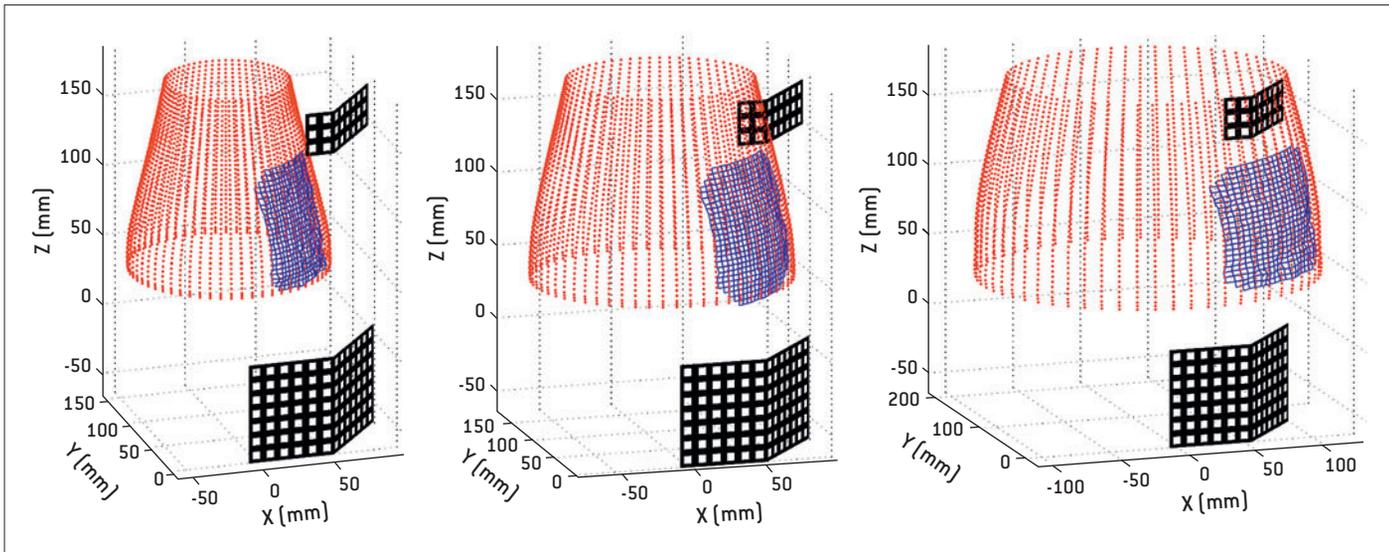


Figure 1. Mise en œuvre expérimentale de la visée stéréoscopique à l'aide de deux miroirs de renvoi filmés par une caméra mécano-optique unique, et exemple d'images gauche et droite obtenues à l'aide de ce système d'imagerie, via un éclairage de la scène par deux flashes pyrotechniques.



**Figure 2.** Évolution de la surface du cylindre en expansion [maillage bleu], pour trois temps séparés d'environ 20  $\mu$ s, superposée à la prévision 3D axisymétrique issue du code de calcul hydrodynamique Hésione.

tournant distribuant 25 images sur un film argentique. Avec cette technologie, les imageurs ne sont pas synchronisables si bien que deux visées sont artificiellement créées par la mise en place de deux miroirs de renvoi filmés par une unique caméra [3].

L'accès à des informations 3D est basé sur l'analyse de paires d'images bidimensionnelles et nécessite une incontournable étape d'étalonnage stéréoscopique. L'adéquation avec les contraintes de « champ de tir » et le manque de souplesse de l'acquisition analogique (nécessitant un développement, une numérisation et un recalage spatial des images) ont conduit à la mise en place définitive de mires calibrées en forme de livre ouvert [3,4] qui sont détruites au cours de l'expérience.

**Les associations spatiale** (relations univoques entre les images gauche et droite) et **temporelle** (suivi d'un point au cours de sa déformation) sont basées sur la corrélation d'images [1,2] dont les performances sont intimement liées au marquage initial réalisé sur la surface de l'objet. Dans des applications les plus courantes [1,2], ce marquage est obtenu par mouchetis de peinture. Pour nos expériences, cette opération a été adaptée de manière à ne pas perturber le phénomène, à obtenir un fort contraste et à être résistant au passage des chocs débouchant sur la surface : la gravure par attaque laser [3] a permis de concilier ces exigences.

La présence de grands déplacements 3D implique des mouvements d'amplitude importante sur les images enregistrées qui perturbent l'emploi de techniques basées sur la corrélation, malgré les stratégies multi-échelles qu'elles incorporent [2]. Une phase de prétraitement a été développée de manière à stabiliser la séquence en anticipant au mieux l'expansion apparente de l'objet. Cette technique est rendue possible grâce au couplage avec les résultats issus du code hydrodynamique Hésione, produit par le CEA-DAM, qui conduit à initialiser de façon plus optimale l'algorithme de corrélation, lui permettant d'atteindre des champs résolus et fiables.

Tous les points précédents étant maîtrisés, la reconstruction 3D de la surface en découle (voir un exemple sur la

**figure 2**). L'estimation des incertitudes, pour les différents postes de dégradation des mesures expérimentales, est ensuite menée par propagation d'erreurs. Cette fourniture permet de chiffrer la confiance sur les positions résultantes mais aussi de prédire les améliorations à venir en fonction des progrès attendus sur les dispositifs expérimentaux, et notamment les caméras.

## Perspectives

Cet article démontre la faisabilité de la reconstruction de l'état de surface d'un objet en grande déformation par imagerie ultra-rapide et illustre son application aux études expérimentales de la localisation, cruciales pour la validation des approches numériques. Aujourd'hui, la principale voie de progrès réside dans l'amélioration de la technique d'imagerie avec l'emploi de plusieurs caméras dont la résolution serait augmentée. Un moyen prometteur de ce type est en cours de développement au sein du CEA-DAM [5] ; il est basé sur un éclairage laser diffus et ultra-bref (quelques ns) couplé à une caméra numérique intensifiée.

## RÉFÉRENCES

- [1] M. A. SUTTON, J.J. ORTEU, H. W. SCHREIER, "Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications", Springer, Berlin, Germany, 2009.
- [2] G. BESNARD, F. HILD, S. ROUX, "Finite-element displacement fields analysis from digital images: application to Portevin-Le Chatelier bands", *Experimental Mechanics*, **46**(6), p. 789–803 [2006].
- [3] G. BESNARD, *Caractérisation et quantification de surfaces par stéréocorrélation pour des essais mécaniques du quasi statique à la dynamique ultra-rapide*, Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan [2010].
- [4] G. BESNARD *et al.*, "Characterization of necking phenomena in high-speed experiments by using a single camera", *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, Vol. 2010, ID 215956 [2010].
- [5] P.-A. FRUGIER *et al.*, "Laser imaging: picturing high-explosive driven experiments with nanoseconds to picoseconds exposure times", Proc. 29<sup>th</sup> International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, Morioka, Japan, 20-24 Septembre 2010.