

**La dynamique fait son cinéma :
De l'apport de l'imagerie et des mesures de champs cinématiques
pour l'analyse du comportement dynamique des matériaux**

F. Hild, G. Besnard, S. Pattofatto, S. Roux, H. Zhao
LMT, ENS Cachan / CNRS / Université Paris Saclay
61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan Cedex
{prenom.nom}@lmt.ens-cachan.fr

Mots clés : Endommagement, fissuration, imagerie rapide, photomécanique, tomographie

1 INTRODUCTION

Depuis de nombreuses décennies, l'imagerie rapide a permis d'observer des phénomènes se produisant sur des échelles de temps très petites (de l'ordre de la milliseconde voire de la microseconde). Elle est devenue « la rétine du savant » [1]. Avec l'avènement plus récent des caméras numériques, de nouvelles applications sont possibles (p.ex. la tomographie rapide). L'utilisation quantitative d'images est également pratiquée, notamment grâce aux techniques photomécaniques. Différentes applications illustreront les apports pour l'analyse du comportement mécanique des matériaux sous sollicitations dynamiques.

La présentation qui suit ne se veut pas exhaustive. Elle a plutôt pour but de donner un certain nombre de références qui devraient permettre au lecteur de débiter sa recherche bibliographique. Dans une première partie, un bref historique de l'imagerie rapide est introduit. Les aspects technologiques, bien qu'effleurés, sont utiles à connaître si l'on veut comprendre les subtilités liées à l'utilisation de telles caméras dans des conditions souvent extrêmes. Cela devient indispensable si l'on veut utiliser ces imageurs à des fins quantitatives. A titre de première illustration de l'utilisation des caméras rapides, la ciné-tomographie (ou tomographie 4D) est introduite dans son contexte premier d'utilisation (c.-à-d. le domaine médical), puis son extension actuelle à la science et mécanique des matériaux. Dans la deuxième partie, des observations de phénomènes beaucoup plus rapides que ceux mentionnés dans le cas de la ciné-tomographie sont discutés pour un essai d'impact sur la tranche. La raison de ce choix est liée au fait que cet essai a été spécifiquement conçu pour permettre une visualisation *in situ*. Enfin, la troisième partie introduit un certain nombre de techniques photomécaniques qui ont conduit à des analyses quantitatives d'essais dynamiques. Le lecteur souhaitant avoir plus d'informations sur les différentes techniques introduites pourra se reporter à des ouvrages de référence (p.ex. [2, 3, 4]). Et maintenant, que la séance commence !

2 UN BREF HISTORIQUE DE L'IMAGERIE RAPIDE

2.1 De l'avènement des caméras ultra-rapides

Depuis l'avènement de la photographie, les premières applications au suivi d'objets animés furent menées par Talbot en 1852 à l'aide de flashes [5, 6]. Le déclenchement synchronisé de 12 appareils photographiques permit à Muybridge de confirmer en 1878 la conjecture de Marey [7] concernant le mouvement du cheval au pas de galop¹ [8]. A la suite de ces résultats, Marey développa un « fusil

1. la réponse sera donnée lors de l'exposé

photographique » qui produisait une série de clichés instantanés distincts. Il a notamment pu saisir le mouvement d'une mouette [9]. Le fusil photographique utilisait une plaque circulaire, qui avançait d'un angle constant à chaque fermeture d'obturateur. La chronophotographie, c'est-à-dire la prise d'une succession de photographies à intervalles de temps réguliers, était née [10]. En 1889, Marey utilisa la pellicule souple. Plusieurs inventions suivirent celles de Muybridge et Marey, comme par exemple le kinétoscope d'Edison (inspiré des travaux de Marey et breveté en 1891) mais aussi le cinématographe des frères Lumière (breveté en 1895).

Les premières photographies d'une balle en vol supersonique (figure 1) furent prises par Mach et Salcher en 1887 [11, 12]. Cette technique fut utilisée par la suite par Mach durant ses études sur le mouvement supersonique. Cranz et Schardin [13] proposèrent l'utilisation de sources lumineuses multiples (huit dans la version initiale), qui, déclenchées de manière séquentielle, permirent d'obtenir des images de très bonne qualité à des vitesses d'acquisition maximales de 300 000 images/s ! Ils utilisèrent leur caméra pour enregistrer des têtes d'ondes et l'interaction oblique d'ondes de choc (réflexion de Mach). En parallèle, les premières caméras rapides furent développées par Eastman Kodak dans les années 1930. Elles étaient basées sur un déplacement de la pellicule, ce qui limitait la cadence à quelques milliers d'images par seconde. Deux alternatives furent ensuite proposées : l'utilisation d'un prisme tournant ou d'un miroir tournant (idée initialement proposée par Wheatstone cent ans auparavant [14, 6]). Ces deux technologies furent utilisées dans le projet Manhattan [15, 16] pour photographier l'explosion des premiers prototypes de bombes atomiques, en particulier pour déterminer la forme et la vitesse de l'implosion initiale. Ceci nécessitait des cadences de la dizaine de millions d'images par seconde. Elles furent atteintes en 1944 grâce aux travaux de l'équipe de Mack au *Los Alamos National Laboratory* qui développa une caméra à miroir tournant [15].

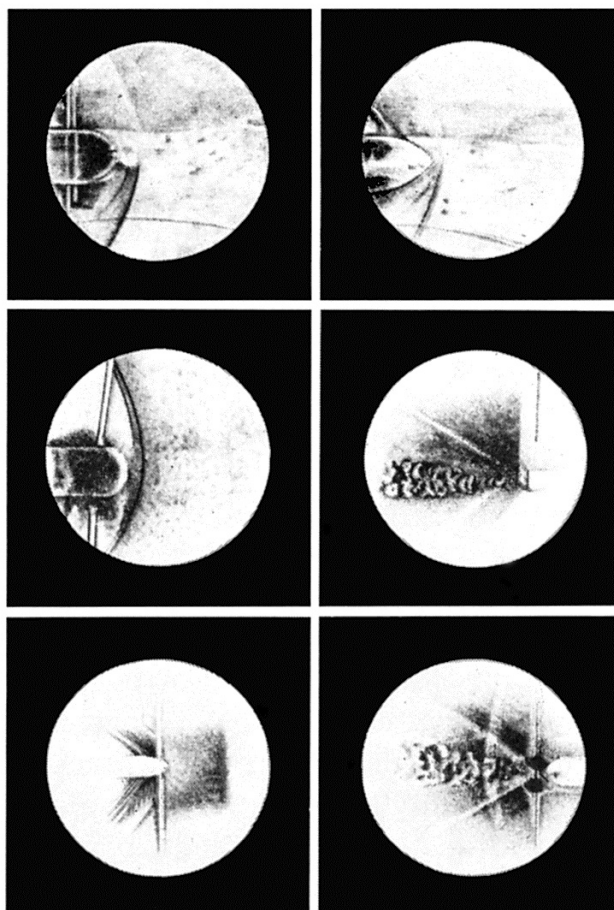


FIG. 1 – Premières images d'un projectile en vol supersonique par Mach et Salcher [11]

Les années d'après guerre virent de nombreux développements visant une plus grande robustesse à de

très hautes vitesses d'acquisition et l'utilisation de différents moyens d'éclairage. L'utilisation de ces caméras s'est souvent faite dans le cadre de programmes de recherche sur la fusion thermonucléaire aux États-Unis, en URSS, en Angleterre et en France. L'imagerie rapide étaient devenue un moyen de diagnostic très précieux dans le cadre de phénomènes dynamiques extrêmement courts (p.ex. ondes de chocs). Les années 1970 virent l'apparition des premières caméras rapides à principe électronique (c.-à-d. utilisant des photocathodes). Ceci marqua une première transition vers le « tout électronique ». L'avènement des capteurs CCD (*charge coupled device*) allait révolutionner la photographie rapide à partir des années 1980. Il préfigurait le passage au numérique. Cependant les premières réalisations étaient encore loin d'atteindre les niveaux des caméras mécano-optiques. La définition des images était de l'ordre de 256×256 pixels et la cadence la plus rapide de 4500 i/s au début des années 1990. La technologie des miroirs tournants couplée à l'utilisation de caméras multi-CCD permet d'augmenter très substantiellement la cadence d'acquisition sans devoir sacrifier la définition (p.ex. 400 000 i/s avec 32 CCD ayant une définition de 1024×1024 pixels pour la caméra Cordin 550-32 de l'ONERA Lille).

L'introduction de la technologie CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*) au début des années 1990 changea à nouveau le domaine des caméras ultra-rapides. En effet, son coût unitaire et son intégration plus facile sur les puces conduisirent de nombreux fabricants à choisir cette voie. Les dernières générations permettent d'atteindre des définitions proches du Mpixel avec des cadences proches du million d'images par seconde. La plupart des laboratoires français actuellement équipés de caméras rapides le sont avec ce type de technologie.

Des cadences encore beaucoup plus rapides peuvent être atteintes grâce à des CCD intensifiés à multicanaux. Ceci permet encore de faire croître la fréquence d'acquisition (le temps de transfert ayant été considérablement réduit). La figure 2 résume le niveau de performance actuel de caméras commerciales ou expérimentales en termes de nombre d'images acquises et de vitesse d'acquisition (ces deux quantités étant souvent antinomiques, sauf en réduisant la définition des images).

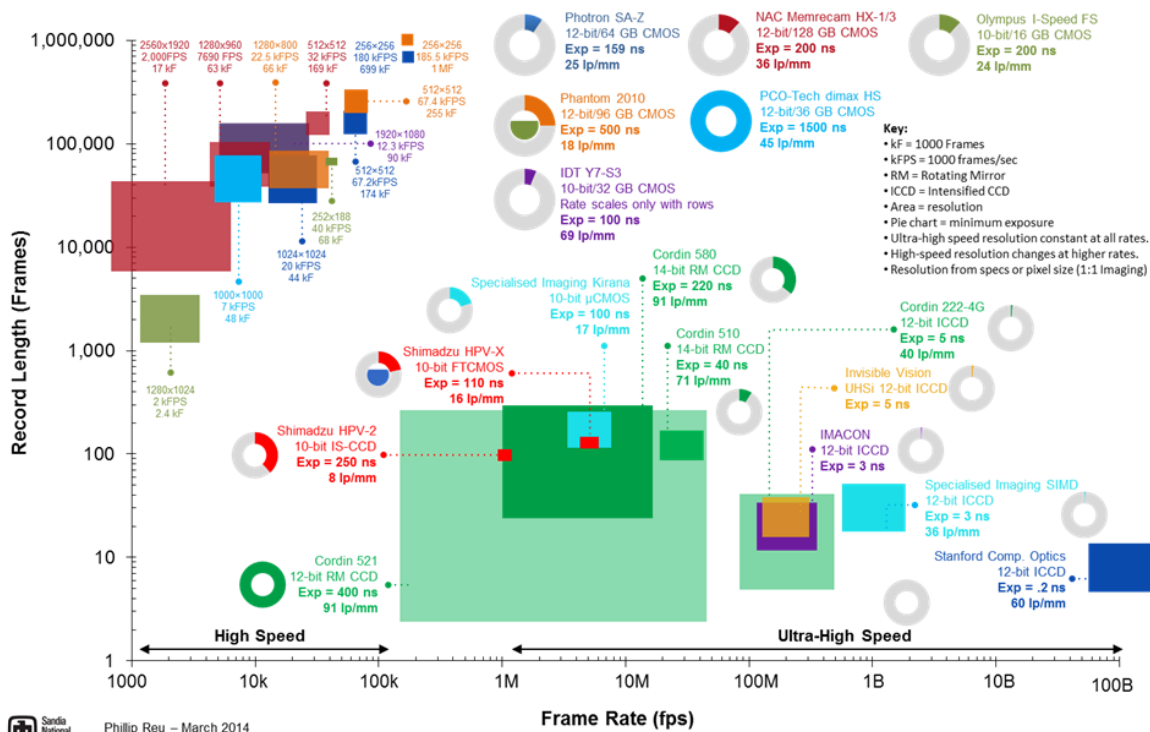
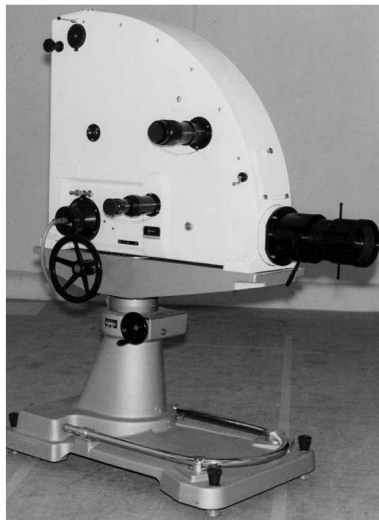


FIG. 2 – Différents types de caméras rapides en fonction du nombre d'images et de la fréquence d'acquisition (d'après Phillip Reu [17])

L'augmentation des cadences et des définitions atteintes se fait généralement par une implantation de

la mémoire de stockage au plus près du capteur. Ceci peut conduire à une diminution du facteur de remplissage (c.-à-d. la proportion de surface active de chaque pixel) ou de l'utilisation de microlentilles. Cela n'a pas nécessairement de conséquence immédiate sur le rendu des images. Par contre, cela peut avoir une influence beaucoup plus grande quant à la qualité métrologique de tels imageurs. Une analyse fine des performances métrologiques est à mener afin d'évaluer les biais et incertitudes associés à ces technologies qui, pour certaines, se démarquent assez nettement des imageurs utilisés pour le suivi d'essais quasi statiques [18]. La figure 3 montre un florilège de caméras rapides qui ont été utilisées dans les résultats ci-dessous.



(a) caméra mécano-optique CI4 du LCA (à miroir tournant [19])



(b) Caméra à photocathode Ultracam FS501 [20]



(c) Caméra CMOS Photron APX RS [21]

FIG. 3 – *Différents types de caméras rapides utilisées dans les exemples ci-dessous*

Bien que souvent considéré comme secondaire, l'éclairage est un élément tout aussi important que la caméra (ultra)rapide. Si les premières images « instantanées » [5] furent obtenues par Talbot, c'est grâce à l'utilisation de flashes. Actuellement, des sources de lumière blanche, lasers voire flashes pyrotechniques sont utilisés. Plus le temps d'intégration est faible, plus puissant devra être l'éclairage pour que l'image ne soit pas sombre (sauf cas particuliers). La synchronisation entre l'éclairage, la caméra et l'expérience est d'autant plus critique que les temps caractéristiques de cette dernière sont faibles.

Il est un domaine connexe à la dynamique des matériaux qui a également profité des développements de l'imagerie rapide : c'est la tomographie (qui mène à la ciné-tomographie [22, 23] ou tomographie 4D [24, 25]).

2.2 Vers la visualisation 3D volumique rapide : la tomographie 4D

La tomographie à rayons X fut introduite dans les années 1970 par Hounsfield [26, 27]. L'utilisation de la transformée de Radon pour la reconstruction à partir de différentes coupes fut proposée par Cormack dans les années 1960 [28, 29]. Ces deux travaux complémentaires furent récompensés par le prix Nobel 1979 de physiologie ou médecine pour « *le développement de la tomographie* ». Son utilisation dès le début des années 1980 dans le domaine médical révolutionna la manière dont sont menés différents diagnostics médicaux par l'utilisation de plus en plus systématique des scanners [30]. Une des difficultés de cette technique est que le corps humain n'est pas fixe lors de l'acquisition. Par exemple, le cœur continue de battre et il fallut attendre le milieu des années 1980 pour voir apparaître la tomographie cardiaque basée sur la technologie du scanner par faisceau d'électrons [31] ; la ciné-tomographie était née [22]. Le faisceau d'électrons est dévié par des bobines électromagnétiques et vient balayer un anneau de cibles en tungstène qui gèrent des rayons X qui traversent le patient. Ce

type de technologie permet de réduire le temps de scan à 50–100 ms, ce qui rendit possible l'imagerie d'organes en mouvement [32]. Une des premières applications concerna la détection de la calcification des artères [33, 34, 35].

Le scanner multi-barrettes (de deux barrettes ou rangées de détecteurs sur le premier modèle de 1993, jusqu'à 320 barrettes actuellement [36]) associé à la technique hélicoïdale permet des coupes plus fines et l'accession à la reconstruction tridimensionnelle de structures de taille réduite (artères coronaires ou osselets de l'oreille moyenne, par exemple). Notons enfin que le scanner double tube est le premier scanner à double source mettant en œuvre une technologie dans laquelle deux sources de rayons X disposées à angle droit l'une par rapport à l'autre offrent une vitesse d'acquisition qui conduit à une résolution temporelle (75 ms) deux fois plus élevée.

Cette présentation a eu pour but de montrer comment l'imagerie médicale 3D a fait d'énormes progrès pour visualiser des objets en mouvement. Par exemple, entre 1972, date de l'invention de la tomographie à rayons X, et 2002, un facteur 100 a été gagné sur la rapidité d'acquisition et de reconstruction, et un facteur 30 sur la résolution spatiale [36]. Dans le domaine de la science et de la mécanique des matériaux, la tomographie à rayons X a également ouvert de nouveaux horizons en termes de compréhension, de caractérisation et de modélisation [37, 38]. La tomographie rapide et ultra-rapide a profité des avancées dans le domaine des caméras numériques de dernière génération à base de CMOS (voir partie 2.1). On parle alors de tomographie 4D. Comme pour l'imagerie cardiaque, le but premier a été de figer les mouvements par une acquisition très rapide (typiquement de l'ordre de 0.1 s pour un scan complet à la SLS sur la ligne TOMCAT et à l'ESRF sur la ligne ID15 [39]). Par exemple, la solidification d'un alliage d'aluminium a pu être suivie de manière non destructive [25]. On notera qu'en 2005, il fallait 10 s pour imager une plus petite zone [40]. Il faut maintenant 0.05 s en utilisant 250 projections [23].

3 OBSERVATION DE PHÉNOMÈNES DYNAMIQUES

Comme pour les toutes premières observations du mouvement des animaux et des hommes [8, 9], ou du suivi de la forme et de la vitesse de l'implosion initiale lors du test Trinity [15], différents phénomènes dynamiques ont été observés grâce à l'imagerie ultra-rapide. Les mécanismes d'allumage de différents explosifs furent ainsi analysés grâce à des observations à l'aide d'une caméra à miroir tournant avec un temps inter-image de $5 \mu\text{s}$ [41]. De même, les essais dits « d'impact sur la tranche » furent spécifiquement développés pour permettre l'observation avec des caméras rapides de l'endommagement de matériaux fragiles tels que le verre [42, 43], les céramiques [44, 45, 46, 47], les roches [48] et les bétons [49, 50]. Ces données expérimentales ont notamment permis de développer un modèle de fragmentation dynamique [51].

A titre d'illustration, la figure 4 montre deux photographies prises avec la caméra Ultramac FS501 (figure 3(b)) $2 \mu\text{s}$ et $3 \mu\text{s}$ après l'impact d'une céramique (SiC) par un projectile en acier (100C6) à une vitesse de 200 m/s. La majorité des fissures n'excède pas une taille de quelques millimètres. Suite à ces observations, un mécanisme d'amorçage multiple et d'obscurcissement a été proposé [52].

Dans certains cas, les observations par caméra ultra-rapide peuvent être rapprochées des simulations numériques. Par exemple, la simulation d'un essai de compression quasi statique sur deux céramiques différentes a pu être validée grâce à des images obtenues à l'aide d'une caméra Ultramac FS501 [54]. Ainsi, il a été montré que la rupture était induite par un amorçage (en traction) sur la rugosité de surface des échantillons.

Ces quelques exemples montrent qu'avoir accès à des « instantanés » lors de l'analyse de phénomènes extrêmement rapides est une aide précieuse quant à la compréhension des mécanismes sous-jacents. D'autres exemples peuvent être trouvés dans l'article de synthèse de Field et coll. [55]. Cependant, ces informations ne constituent en général que la première phase de l'analyse. On souhaite souvent utiliser les images acquises dans des buts de quantification.

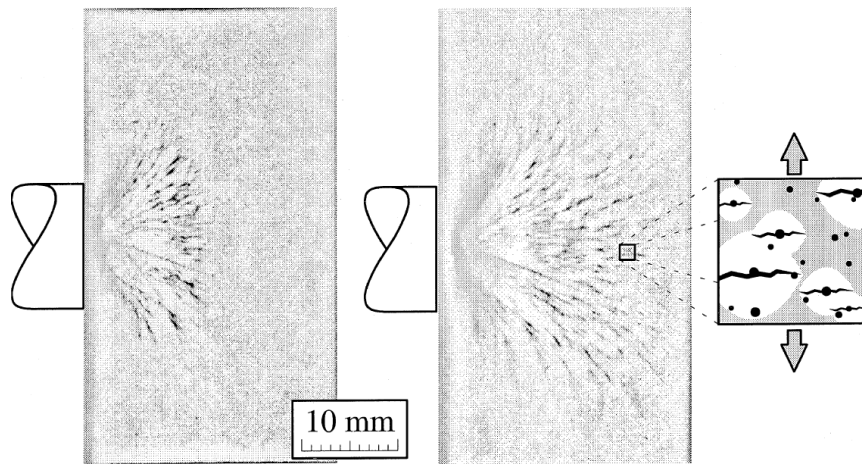


FIG. 4 – Images d'un essai d'impact sur la tranche d'un carbure de silicium ($2 \mu s$ et $3 \mu s$ après impact [53]) et mécanisme d'endommagement proposé [52]

4 ANALYSES QUANTITATIVES DE PHÉNOMÈNES DYNAMIQUES

Les exemples qui suivent ont pour vocation d'illustrer quelques résultats obtenus par différentes techniques d'analyse quantitative d'images obtenues par caméras rapides. L'exhaustivité n'a pas été recherchée mais plutôt l'aspect historique associé très souvent à la fissuration.

4.1 Méthode des caustiques

La méthode des caustiques est l'une des plus simples à mettre en œuvre lors de l'observation de phénomènes ultra-rapides. Elle fut initialement introduite par Schardin [56] et Manogg [57]. Ce dernier a montré qu'il était possible de mesurer des facteurs d'intensité des contraintes par la connaissance de la taille de la zone d'ombre. En effet, pour les matériaux transparents, l'intensification des contraintes au voisinage de la pointe de fissure a deux effets : elle réduit l'épaisseur locale de la plaque (par effet Poisson) et modifie l'indice de réfraction du milieu. La fissure joue alors le rôle de lentille divergente. Ceci conduit à la formation d'une zone d'ombre limitée par une zone annulaire très brillante (figure 5). Kalthoff et coll. [58] ont été les premiers à utiliser cette technique pour évaluer des facteurs d'intensité des contraintes dynamiques. Pour une évaluation précise de ce dernier, la prise en compte des effets dynamiques s'avère souvent nécessaire [59]. D'autres groupes tels que celui de Theocaris [60] emboîtèrent le pas. Cette méthode a permis de déterminer les évolutions du facteur d'intensité des contraintes en fonction de la vitesse de propagation des fissures, elle-même une inconnue à déterminer.

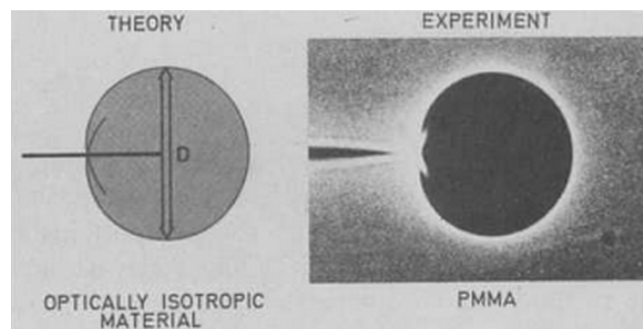


FIG. 5 – Caustique observée dans un échantillon fissuré de PMMA [58]

Cette méthode a continué à être utilisée pour des matériaux transparents voire opaques. Pour ces der-

niers, seule la variation de hauteur conduit à la formation des caustiques [61]. Par exemple, l'analyse de la bifurcation multiple lors de la propagation rapide de fissures a pu être visualisée et quantifiée [62]. Cependant, d'autres techniques ont pris le pas de par le fait qu'elles donnaient accès à des informations de champs.

4.2 Photoélasticité

Les premières utilisations de la photoélasticité à l'étude de fissures se propageant de manière instable remontent à la fin des années 1950 [63]. Irwin proposa une approche simple pour la détermination du niveau de facteur d'intensité des contraintes en ajoutant à la solution de Westergaard la contribution de la contrainte T [64]. Le champ de contrainte put ainsi être visualisé et surtout quantifié au voisinage de la pointe de fissure [65]. Les années 1970 virent des développements qui aboutirent à la prise en compte d'une véritable information de champ et à une minimisation au sens des moindres carrés de la distance entre champs expérimentaux et prévus analytiquement [66]. Ainsi, la mixité modale fut également déterminée par comparaison des isochromatiques expérimentales et numériques [67]. Ces dernières donnent une visualisation des iso-(différences de contraintes principales).

La figure 6 illustre une utilisation assez récente de la photoélasticité. Elle a permis aux auteurs [68] de montrer que la vitesse de fissuration en mode II pouvait dépasser la célérité des ondes de cisaillement. Ce résultat, obtenu pour un matériau modèle (Homalite-100), est supposé également s'appliquer à des situations de tremblement de terre.

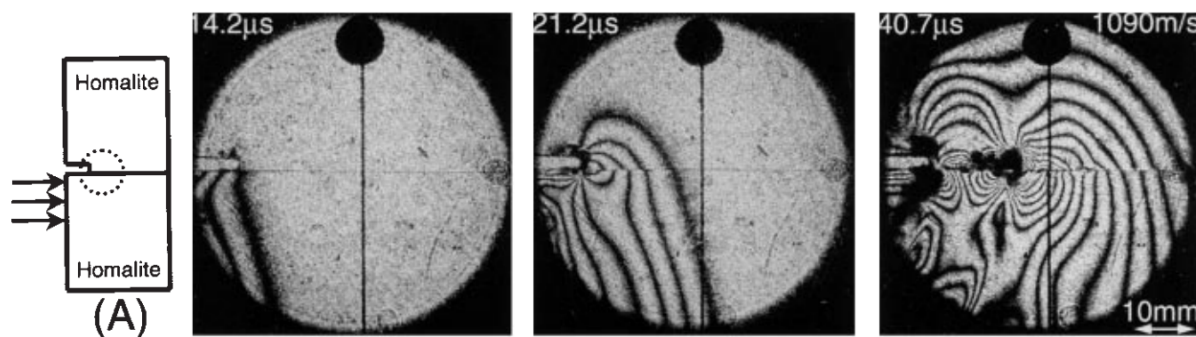


FIG. 6 – Séquence d'images montrant les isochromatiques autour d'une fissure se propageant suivant un plan faible de l'Homalite-100 [68]

Comme pour la méthode des caustiques, tous les types de caméras rapides existant à l'époque (c.-à-d. Crazz-Schardin, mécano-optiques à miroir tournant) furent utilisées. Un des points cruciaux de la photoélasticité est lié à la bonne définition des imageurs ; les caméras Crazz-Schardin sont particulièrement bien adaptées [55].

4.3 Moiré interférométrique

Une des premières applications de moiré interférométrique a été proposée par Dantu au cours des années 1950 [69, 70]. Les premières analyses de phénomènes dynamiques furent proposées par Chiang et Jaisingh [71] en 1973. Elles correspondaient à l'extension au cas dynamique des travaux de Ligtenberg sur la flexion de plaques [72]. Cette technique, assez délicate à mettre au point [73], mit plus de temps à être déployée dans le domaine de la dynamique. Par exemple, elle fut utilisée pour évaluer les déformations planes du PMMA soumis à un impact [74]. Elle permet également la mesure du facteur d'intensité des contraintes dynamiques de divers matériaux [75].

Des champs de déformation furent également évalués lors d'essais d'impact sur la tranche sur céramique. Une des difficultés de ce type de matériau est le très faible niveau de déformation [76]. La figure 7 montre les franges de moiré acquises ainsi que le champ de déformation principale maximale évalué par post-traitement des déplacements mesurés. Ces informations très précieuses permirent de

valider un modèle de fragmentation dynamique basé sur les observations de la figure 4. En effet, les déformations mesurées furent directement comparées à celles prédites par un modèle d'endommagement anisotrope [52]. En particulier, l'anisotropie de l'endommagement est indispensable pour trouver les bons niveaux de déformation [77].

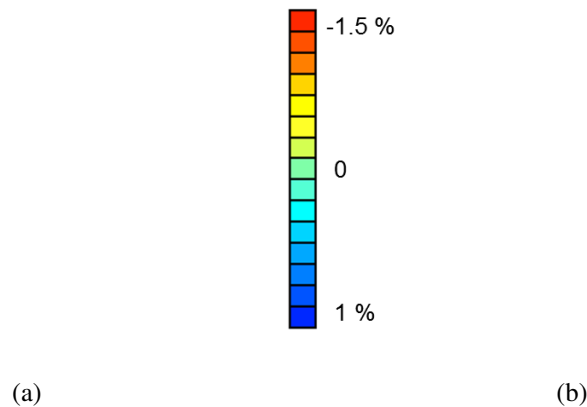


FIG. 7 – (a) Franges de moiré observées avec la caméra Ultramac FS501 $2 \mu s$ après impact sur la tranche d'une céramique. (b) Champ de déformation principale maximale correspondant [52]. Les deux films montrent leur évolution au cours du temps (temps inter-image : $0.5 \mu s$)

4.4 Autres techniques interférométriques

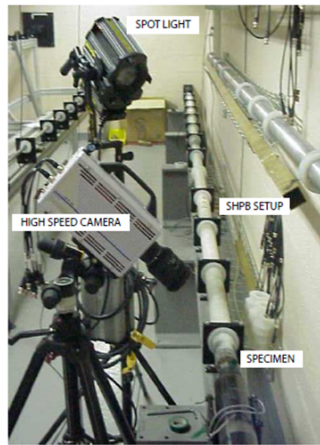
D'autres techniques interférométriques furent utilisées dans le domaine de la dynamique rapide. Parmi celles-ci, on peut citer la photographie de speckle laser [78, 79] ou en lumière blanche [80]. L'holographie interférométrique a également été employée [81] ainsi que la *shearographie* dans une configuration adaptée à l'imagerie rapide [82]. La plupart d'entre elles furent appliquées à l'analyse de la fissuration dynamique. On notera que ces techniques nécessitent des précautions expérimentales non négligeables lors d'expérimentations en dynamique rapide.

4.5 Corrélation d'images

La corrélation d'images, introduite au tout début des années 1980 [83, 84], fut très vite appliquée à l'étude de la fissuration sous sollicitations dynamiques. En effet, dès 1985, une première série de résultats fut obtenue lors d'un essai de flexion 3-points sur une Araldite B [85]. Les auteurs utilisèrent une caméra Craz-Schardin. Les champs de déplacement mesurés furent ensuite comparés à la solution statique pour l'estimation des facteurs d'intensité des contraintes. Un assez bon accord fut trouvé lorsque les résultats obtenus furent comparés à ceux donnés par l'analyse des caustiques. Ce type d'analyse fut poursuivi avec des conditions expérimentales améliorées ainsi que de nouveaux algorithmes de corrélation [86, 87, 88].

Depuis le début des années 2000, le nombre d'applications de la corrélation d'images à des essais en dynamique rapide a crû [90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97]. L'analyse du comportement mécanique de différentes mousses sous choc fut également rendue possible par le suivi des déformations à l'aide d'essais originaux aux barres de Hopkinson à l'aide de la corrélation d'images 2D [89]. La figure 8(a) montre une des configurations utilisant une caméra Photron APX RS (figure 3(c)). Un front de choc fut observé pour des vitesses très faibles (de l'ordre de 50 m/s, voir figure 8(b)). A partir de ces données, on peut montrer que la sensibilité à la vitesse observée expérimentalement n'est pas liée au comportement intrinsèque du matériau mais à un effet de structure [98].

On notera que dans la plupart des applications de la corrélation d'images en dynamique rapide, peu (voire aucun) développement spécifique n'est fait. Cependant, un des inconvénients des capteurs CMOS est leur faible définition pour des cadences supérieures ou égales à 100 000 i/s. Pour pallier le manque d'information spatiale, des algorithmes utilisant plus d'une paire d'images ont été



(a)

(b)

FIG. 8 – (a) Une des configurations expérimentales pour l’analyse des fronts de choc dans une mousse d’aluminium. (b) Film de la configuration déformée et maillages déformés mesurés par corrélation d’images globale à base d’éléments Q4 [89]

développés et appliqués en particulier à des suivis d’essais dynamiques [99, 100]. On parle alors de corrélation cinématographique [99].

La stéréocorrélation d’images utilisée pour la mesure de formes 3D et de champs 3D surfaciques [101] nécessite généralement la synchronisation de deux caméras rapides lorsqu’elle est déployée pour le suivi d’essais dynamiques. Les caméras à base de CMOS peuvent être facilement synchronisées (figure 9(a)). Ainsi, des essais où la sollicitation mécanique est induite par le souffle d’un explosif ayant détoné furent analysés [102]. Une autre application concernait des essais aux barres d’Hopkinson (en configuration de traction). La striction dans de l’aluminium quasi pur fut analysée (figure 9(b)). Ces essais nécessitèrent un certain nombre d’améliorations de la stéréocorrélation pour pouvoir atteindre des niveaux de déformation de 600 % [103]. Il fut montré que la formation de la striction principale n’était pas sensible à la vitesse de déformation (lorsque celle-ci reste inférieure à 1600 s^{-1}). Par contre, le niveau de déformation à l’amorçage est aléatoire.



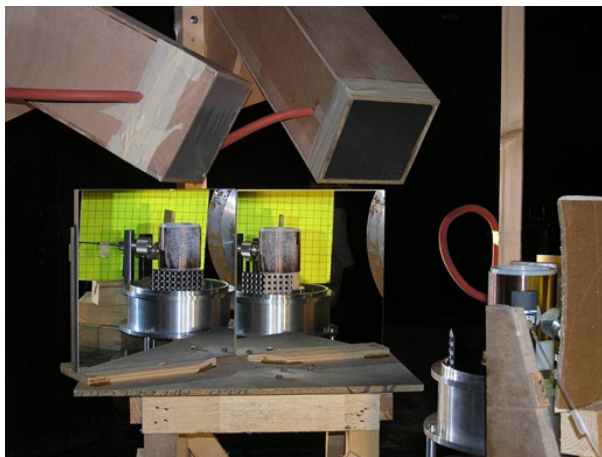
(a)

(b)

FIG. 9 – (a) Montage expérimental pour analyser la striction par deux caméras rapides synchronisées. L’éprouvette est entourée par le cercle rouge. (b) Surfaces 3D reconstruites (film) à partir des mesures par stéréocorrélation d’images. Le codage en couleur correspond à la valeur actuelle du rayon de l’éprouvette [103]

Enfin, l’exemple qui suit illustre un essai en détonique dans laquelle un cylindre en cuivre est soumis

à une expansion rapide générée par un explosif. Dans ces expérimentations, les différents points de vue sont donnés par des miroirs de renvoi car l'observation se fait avec une caméra à miroir tournant (figure 3(a)) et à film analogique qui, de par sa technologie, ne peut pas être synchronisée avec une autre caméra de même type [104]. L'obtention d'images synchrones prises sous des angles de vue différents se fait par l'utilisation de miroirs de renvoi séparés d'un angle de 15° (figure 10(a)). Des flashes pyrotechniques ont été utilisés dans le cas présent. L'étalonnage classique (a priori) à partir de mire n'est pas possible. Une procédure particulière a été développée dans laquelle deux mires sont imagées en même temps que l'expansion de l'échantillon de cuivre. De plus, afin d'améliorer l'association spatiale et temporelle, des méthodes de correction des grands déplacements, basées sur l'image elle-même ou sur un calcul hydrodynamique, ont été élaborées. Ceci permet d'investiguer l'expansion et le relèvement de cylindres [19, 105]. Les formes 3D reconstruites à la fin de la séquence d'acquisition sont montrées en figure 10(b). Les fluctuations de forme sont induites par des strictions multiples.



(a)

(b)

FIG. 10 – (a) Configuration expérimentale d'un essai d'expansion de cylindre utilisant deux miroirs de renvoi et un étalonnage in situ. (b) Formes 3D et mires reconstruites par stéréocorrélation d'images. Le maillage (bleu) correspond aux positions 3D reconstruites et les points (rouges) la surface interpolée (film)

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Au cours de ces dernières décennies, on a assisté à une augmentation significative des résultats publiés dans la littérature ouverte traitant du comportement dynamique des matériaux. Ceci est en partie lié à une « démocratisation » plus marquée grâce au développement de nouveaux modèles numériques, notamment à base de capteurs CMOS à côté de caméras (très chères) réservées à quelques ingénieurs et chercheurs du domaine de la défense. Une application « colatérale » utilisant les caméras rapides actuelles concerne la tomographie à rayons X. En effet, le rayonnement intense des synchrotrons de troisième génération permet d'acquérir des radiographies en des temps très courts. Ainsi, la ciné-tomographie est actuellement possible à des fréquences de quelques dizaines de Hertz. Des fréquences encore plus grandes devraient pouvoir être atteintes grâce notamment au fait que les mesures cinématiques nécessitent beaucoup moins de radiographies que la reconstruction complète de volumes [106] et que, dans certaines conditions, la reconstruction elle-même peut être menée avec un nombre restreint de projections [107].

A l'instar des observations par microscopie optique ou électronique voire par tomographie, une première voie d'utilisation de l'imagerie rapide est d'analyser les mécanismes de déformation, d'endom-

agement et de rupture des matériaux sous sollicitations dynamiques. Ces informations servent de guide pour la construction de modèles de comportement pour dimensionner des structures soumises à des chargements sous sollicitations dynamiques [108].

L'analyse quantitative des images est une seconde voie d'investigation. La plupart des techniques photomécaniques initialement développées pour l'analyse d'essais quasi statiques [3] ont également été utilisées dans divers contextes illustrés ci-dessus. La mesure de champs cinématiques n'est pas nécessairement la seule faite lors d'un essai dynamique. D'autres moyens de diagnostic peuvent être déployés [55]. Parmi ceux-ci, la thermographie infrarouge [109, 110, 111, 112, 113, 114] est une technique alternative, notamment pour permettre une analyse énergétique complète de l'essai ou pour analyser la formation de copeaux [115]. De manière générale, la multiplication des informations extraites d'un essai doit permettre de mieux le comprendre, l'analyser et l'exploiter.

Enfin, la mesure de champ n'est généralement pas une fin en soi. Elle correspond à la première étape d'un processus d'identification voire de validation. Différentes approches sont actuellement développées [3]; certaines d'entre elles sont étendues à la dynamique rapide. Le développement de ces techniques ne vient pas simplement améliorer la productivité ou l'efficacité du mécanicien réalisant des essais. Il peut aussi remettre en cause la conception même des essais. En conséquence des essais complexes peuvent être imaginés, non pour le plaisir d'une complication additionnelle, mais par souci d'efficacité, de manière à pouvoir appréhender sur un seul essai le plus d'information utile sur le comportement recherché.

REMERCIEMENTS

Les résultats discutés ou présentés ici ont été obtenus dans le cadre de projets soutenus par le CEA-DAM, le CNRS, la DGA, EADS-IW, Nitrochimie, la région Île de France et Saint Gobain. Que X. Brajer, C. Cottenot, C. Denoual, A. Dragon, I. Elnasri, A. Fanget, P. Forquin, Y. Girard, S. Grange, S. Guérard, J.-M. Guimard, R. Gy, O. Hopperstad, J.M. Lagrange, M. Langseth, H. Leclerc, E. Maire, S. Mencacci, L. Rota, N. Swiergiel, V. Tarigopula, H. Tsitsiris et H. Trumel soient chaleureusement remerciés pour les discussions autour des thèmes abordés dans cet article.

Références

- [1] A. Gunthert. La rétine du savant. *Études photographiques*, 7(mai), <http://etudesphotographiques.revues.org/205>, consulté le 02/01/15 (2000)
- [2] P. Rastogi (ed.), *Photomechanics, Topics in Applied Physics*, vol. 77 (Springer, Berlin (Germany), 2000)
- [3] M. Grédiac, F. Hild (eds.), *Mesures de champs et identification en mécanique des solides*. Traité MIM (Hermès, Paris (France), 2011)
- [4] P. Rastogi, E. Hack (eds.), *Optical Methods for Solid Mechanics. A Full-Field Approach* (Wiley-VCH, Berlin (Germany), 2012)
- [5] H. Talbot, *Phil. Mag. Series 4* **3**(15), 73 (1852)
- [6] C. Ramalingam, *Endeavour* **32**(3), 86 (2008)
- [7] E.J. Marey, *C. R. hebdom. séances Acad. Sci.* **75**, 883 (1872)
- [8] G. Tissandier, *La Nature* **289**(14 décembre), 23 (1878)
- [9] E.J. Marey, *La Nature* **464**(22 avril), 326 (1882)
- [10] E.J. Marey, *C. R. hebdom. séances Acad. Sci.* **103**, 537 (1886)
- [11] E. Mach, P. Salcher, *Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Wien Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse*, **95**(IV-V), 764 (1887)
- [12] C. Hoffmann, *Endeavour* **33**(1), 18 (2009)
- [13] C. Cranz, H. Schardin, *Z. Phys.* **56**, 147 (1929)

- [14] S. Ray, *High-Speed photography and photonics* (Focal Press, Oxford (UK), 1997)
- [15] B. Brixner, Proc. SPIE **2869**, 30 (1997)
- [16] T. Lefebvre, 1895. Mille huit cent quatre-vingt-quinze **39**, 127 (2003)
- [17] P. Reu, communication personnelle (2014)
- [18] V. Tiwari, M. Sutton, S. McNeill, Exp. Mech. **47**(4), 561 (2007)
- [19] G. Besnard, Caractérisation et quantification de surfaces par stéréocorrélation pour des essais mécaniques du quasi statique à la dynamique ultra-rapide. Thèse de doctorat, ENS Cachan (2010)
- [20] B. Garfield, Proc. SPIE **1801**, 192 (1993)
- [21] Photron APX RS. <http://www.photron.com>, consulté le 02/01/15 (2015)
- [22] M. Lipton, C. Higgins, D. Farmer, D. Boyd, Radiology **152**(3), 579 (1984)
- [23] T. dos Santos Rolo, A. Ershov, T. van de Kamp, T. Baumbach, Proc. Nat. Acad. Sci. **111**(11), 3921 (2014)
- [24] E. Rietzel, T. Pan, G. Chen, Med Phys. **32**(4), 874 (2005)
- [25] L. Salvo, M. Di Michiel, M. Scheel, P. Lhuissier, B. Mireux, M. Suéry, *Ultra Fast In Situ X-Ray Micro-Tomography: Application to Solidification of Aluminium Alloys* (Trans Tech Publications, 2012), vol. 706-709, pp. 1713–1718
- [26] G. Hounsfield, Br. J. Radiol. **46**(552), 1016 (1973)
- [27] J. Ambrose, G. Hounsfield, Br. J. Radiol. **46**(542), 148 (1973)
- [28] A. Cormack, J. Appl. Phys. **34**(9), 2722 (1963)
- [29] A. Cormack, J. Appl. Phys. **35**(10), 2908 (1964)
- [30] B. Mae, *The revolution in Medical Imaging* (Rosen Pub. Group, New York, NY (USA), 2003)
- [31] D. Boyd, M. Lipton, Proc. IEEE **71**(3), 298 (1983)
- [32] U. Schoepf (ed.), *CT of the Heart. Principles and Applications* (Humana Press, Totowa, NJ (USA), 2005)
- [33] S. Tanenbaum, G. Kondos, K. Veselik, M. Prendergast, B. Brundage, E. Chomka, Am. J. Cardiology **63**(12), 870 (1989)
- [34] A. Agatston, W. Janowitz, F. Hildner, N. Zusmer, M. Viamonte, R. Detrano, J. Am. Coll. Cardiol. **15**(4), 827 (1990)
- [35] M. Molle, S. Molle, A. Hernigou, J. Radiol. **75**(12), 655 (1994)
- [36] J. Itzcovitz, D. Dormont, Scanographie à rayons X. Notes de cours. Enseignement du DES radiologie et imagerie médicale, Université Catholique de Louvain (2002)
- [37] J.Y. Buffière, E. Maire (eds.), *Imagerie 3D en mécanique des matériaux* (Hermès-Lavoisier, Paris (France), 2014)
- [38] E. Maire, P.J. Withers, Int. Mat. Rev. **59**(1), 1 (2014)
- [39] P. Lhuissier, M. Scheel, M. Di Michiel, E. Boller, J. Adrien, E. Maire, L. Salvo, J.J. Blandin, M. Suéry, *Ultra Fast Tomography: New Developments for 4D Studies in Material Science* (John Wiley & Sons, Inc., 2012), pp. 203–208
- [40] O. Ludwig, M. Dimichiel, L. Salvo, M. Suéry, P. Falus, Metall. Mat. Trans. A **36**(6), 1515 (2005)
- [41] J. Field, G. Swallowe, S. Heavens, Proc. R. Soc. Lond. A **382**(1782), 231 (1982)
- [42] U. Hornemann, J. Kalthoff, H. Rothenhäusler, H. Senf, S. Winkler, Experimental investigation of wave and fracture propagation in glass - slabs loaded by steel cylinders at high impact velocities. Tech. Rep. E 4/84, EMI, Weil am Rhein (Germany) (1984)
- [43] X. Brajer, P. Forquin, R. Gy, F. Hild, J. Non Cryst. Solids **316**, 42 (2003)
- [44] E. Strassburger, H. Senf, H. Rothenhäusler, J. Phys. IV **coll. C8**(suppl. IV), 653 (1994)
- [45] P. Riou, C. Denoual, C. Cottenot, Int. J. Impact Eng. **21**(4), 225 (1998)

- [46] P. Forquin, L. Tran, P. Louvigné, L. Rota, F. Hild, *Int. J. Impact Eng.* **28**, 1061 (2003)
- [47] J. McCauley, E. Strassburger, P. Patel, B. Paliwal, K. Ramesh, *Exp. Mech.* **53**(1), 3 (2013)
- [48] S. Grange, P. Forquin, S. Mencacci, F. Hild, *Int. J. Impact Eng.* **35**(9), 977 (2008)
- [49] P. Forquin, F. Hild, *ASCE J. Eng. Mech.* **134**(4), 302 (2008)
- [50] P. Forquin, B. Erzar, *Int. J. Fract.* **163**(1), 193 (2010)
- [51] P. Forquin, F. Hild, *Adv. Appl. Mech.* **44**, 1 (2010)
- [52] C. Denoual, F. Hild, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* **183**, 247 (2000)
- [53] P. Riou, Contribution à l'étude de l'endommagement du carbure de silicium lors d'un impact de basse énergie : application aux blindages. Thèse de doctorat, ENSMP (1996)
- [54] P. Forquin, C. Denoual, C. Cottenot, F. Hild, *Mech. Mat.* **35**(10), 987 (2003)
- [55] J. Field, S. Walley, W. Proud, H. Goldrein, C. Siviour, *Int. J. Impact Eng.* **30**, 725 (2004)
- [56] H. Schardin, *Velocity effects in fracture* (Wiley, New York, NY (USA), 1959), pp. 297–329
- [57] P. Manogg, *Glastech. Berichte* **39**, 229 (1966)
- [58] J.F. Kalthoff, J. Beinert, S. Winkler, *Measurements of Dynamic Stress Intensity Factors for Fast Running and Arresting Cracks in Double-Cantilever-Beam Specimens* (1977), vol. STP 627
- [59] C. Liu, A. Rosakis, L. Freund, *Int. J. Solids Struct.* **30**(7), 875 (1993)
- [60] P. Theocaris, *Int. J. Solids Struct.* **14**(8), 639 (1978)
- [61] P. Theocaris, *J. Appl. Mech.* **37**(2), 409 (1970)
- [62] K. Ravi-Chandar, W.G. Knauss, *Int. J. Fract.* **26**(2), 141 (1984)
- [63] A. Wells, D. Post, *Proc. SESA* **16**, 69 (1958)
- [64] G. Irwin, *Proc. SESA* **16**, 93 (1958)
- [65] W. Bradley, A. Kobayashi, *Exp. Mech.* **10**(3), 106 (1970)
- [66] J. Dally, *Exp. Mech.* **19**(10), 349 (1979)
- [67] M. Ramulu, A. Kobayashi, D. Barker, *Exp. Mech.* **25**(4), 344 (1985)
- [68] A. Rosakis, O. Samudrala, D. Coker, *Science* **284**(5418), 1337 (1999)
- [69] P. Dantu, *C.R. Acad. Sci. Paris* **239**, 1769 (1954)
- [70] P. Dantu, *Ann. ITBTP* **121**, 78 (1958)
- [71] F. Chiang, G. Jaisingh, *Exp. Mech.* **13**(4), 168 (1973)
- [72] F. Ligtenberg, *Proc. SESA* **12**(2), 83 (1955)
- [73] V. Deason, J. Epstein, M. Abdallah, *Optics Lasers Eng.* **12**(2-3), 173 (1990)
- [74] J. Huntley, J. Field, *Opt. Eng.* **28**(8), 926 (1989)
- [75] K. Arakawa, J. Drinnon, R.H., M. Kosai, A. Kobayashi, *Exp. Mech.* **31**(4), 306 (1991)
- [76] T. Bertin-Mourot, C. Denoual, G. Dehors, P. Louvigné, T. Thomas, *J. Phys. IV Coll.* **C3**(Suppl. III), 311 (1997)
- [77] C. Denoual, F. Hild, *Eur. J. Mech. A/Solids* **21**(1), 105 (2002)
- [78] J. Huntley, S. Palmer, J. Field, *Proc. SPIE* **0814**, 153 (1987)
- [79] B. Asay, G. Laabs, B. Henson, D. Funk, *J. Appl. Phys.* **82**(3), 1093 (1997)
- [80] X. Hu, S. Palmer, J. Field, *Optics Lasers Technol.* **16**(6), 303 (1984)
- [81] K.E. Fällström, H. Gustavsson, N.E. Molin, A. Wählin, *Exp. Mech.* **29**(4), 378 (1989)
- [82] H. Tippur, A. Rosakis, *Exp. Mech.* **31**(3), 243 (1991)
- [83] W. Peters, W. Ranson, *Opt. Eng.* **21**, 427 (1982)
- [84] M. Sutton, W. Wolters, W. Peters, W. Ranson, S. McNeill, *Im. Vis. Comp.* **1**(3), 133 (1983)
- [85] W. Peters, W. Ranson, J. Kalthoff, S. Winkler, *J. Phys. Coll.* **46**(C5), 631 (1985)
- [86] Y. Chao, P. Luo, J. Kalthoff, *Exp. Mech.* **38**(2), 79 (1998)
- [87] P. Forquin, F. Hild, *Revue Comp. Mat. Av.* **17**(1), 37 (2007)

- [88] P. Forquin, Eur. Phys. J. Spec. Topics **206**(1), 89 (2012)
- [89] I. Elnasri, S. Patoatto, H. Zhao, H. Tsitsiris, F. Hild, Y. Girard, J. Mech. Phys. Solids **55**, 2652 (2007)
- [90] F. Barthelat, Z. Wu, B. Prorok, H. Espinosa, Exp. Mech. **43**(3), 331 (2003)
- [91] J. Kajberg, M. Sjödaahl, in *IUTAM Symposium on Field Analyses for Determination of Material Parameters – Experimental and Numerical Aspects, Solid Mechanics and its Applications*, vol. 109, ed. by P. Stähle, K. Sundin (Springer (the Netherlands), 2003), *Solid Mechanics and its Applications*, vol. 109, pp. 37–49
- [92] A. Gilat, T. Schmidt, J. Tyson, J. Phys. IV **134**, 687 (2006)
- [93] J. Kajberg, B. Wikman, Int. J. Solids Struct. **44**(1), 145 (2007)
- [94] P. Reu, T. Miller, J. Strain Anal. **43**(8), 673 (2008)
- [95] V. Tarigopula, O. Hopperstad, M. Langseth, A. Clausen, F. Hild, Int. J. Solids Struct. **45**(2), 601 (2008)
- [96] F. Pierron, M. Sutton, V. Tiwari, Exp. Mech. **51**(4), 537 (2011)
- [97] D. Saletti, S. Patoatto, H. Zhao, Mech. Mat. **65**, 1 (2013)
- [98] S. Patoatto, I. Elnasri, H. Zhao, H. Tsitsiris, F. Hild, Y. Girard, J. Mech. Phys. Solids **55**, 2672 (2007)
- [99] G. Besnard, S. Guérard, S. Roux, F. Hild, Optics Lasers Eng. **49**, 71 (2011)
- [100] G. Besnard, H. Leclerc, S. Roux, F. Hild, J. Strain Analysis **47**(4), 214 (2012)
- [101] M. Sutton, J. Orteu, H. Schreier, *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic Concepts, Theory and Applications* (Springer, New York, NY (USA), 2009)
- [102] V. Tiwari, M. Sutton, S. McNeill, S. Xua, X. Deng, W. Fourney, D. Bretall, Int. J. Impact Eng. **36**(6), 862 (2009)
- [103] G. Besnard, F. Hild, J. Lagrange, P. Martinuzzi, S. Roux, Int. J. Impact Eng. **49**, 179 (2012)
- [104] G. Besnard, B. Etchessahar, J. Lagrange, C. Voltz, F. Hild, S. Roux, in *28th Int. Cong. High-Speed Imaging and Photonics* (Proc. SPIE 7126, 2008), p. 71261N (DOI:10.1117/12.821892)
- [105] G. Besnard, J. Lagrange, F. Hild, S. Roux, C. Voltz, EURASIP J. Im. Video. Proc. **2010**(215956), 15 p. (2010)
- [106] H. Leclerc, S. Roux, F. Hild, Exp. Mech. (DOI: 10.1007/s11340-014-9871-5) pp. 1–13 (2014)
- [107] S. Roux, H. Leclerc, F. Hild, J. Math. Imaging Vis. **49**(2), 335 (2014)
- [108] A. Dragon, F. Hild, L. Rota, H. Trumel, Mech. & Indust. **1**(5), 521 (2000)
- [109] W. Nowacki, J. Phys. Coll. **46**(C5), 113 (1985)
- [110] A. Zehnder, A. Rosakis, J. Mech. Phys. Solids **39**(3), 385 (1991)
- [111] J. Mason, A. Rosakis, G. Ravichandran, Mech. Mat. **17**(2-3), 135 (1994)
- [112] M. Zhou, A. Rosakis, G. Ravichandran, J. Mech. Phys. Solids **44**(6), 981 (1996)
- [113] D. Rittel, Int. J. Solids Struct. **35**(22), 2959 (1998)
- [114] N. Ranc, V. Pina, P. Hervé, J. Phys. IV **10**(PR9), 347 (2000)
- [115] G. Sutter, L. Faure, A. Molinari, N. Ranc, V. Pina, Int. J. Mach. Tools Manuf. **43**(7), 671 (2003)