



HAL
open science

Mesures 3D par stéréo-vision de la déformation d'un verre feuilleté sous impact rigide

Corentin Le Gourriec, Xuyang Chang, Bastien Durand, Richard Villey,
Xavier Brajer, Stéphane Roux

► **To cite this version:**

Corentin Le Gourriec, Xuyang Chang, Bastien Durand, Richard Villey, Xavier Brajer, et al.. Mesures 3D par stéréo-vision de la déformation d'un verre feuilleté sous impact rigide. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280217

HAL Id: hal-04280217

<https://hal.science/hal-04280217>

Submitted on 10 Nov 2023

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.

Mesures 3D par stéréo-vision de la déformation d'un verre feuilleté sous impact rigide

Corentin LE GOURRIÉREC^{a,b}, Xuyang CHANG^a, Bastien DURAND^a, Richard VILLEY^c, Xavier BRAJER^b, Stéphane ROUX^a

a. Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 4 Avenue des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette, France

b. Saint-Gobain Research Paris, 39 Quai Lucien Lefranc, 93300 Aubervilliers, France

c. Saint-Gobain Research Compiègne, 1 rue de Montluçon, 60150 Thourotte, France

E-mails : corentin.le_gourrierec-braun@ens-paris-saclay.fr, xuyang.chang@ens-paris-saclay.fr, bastien.durand@ens-paris-saclay.fr, richard.villey@saint-gobain.com, xavier.brajer@saint-gobain.com, stephane.roux@ens-paris-saclay.fr

Résumé

Le verre feuilleté est le matériau privilégié pour la création de vitrages de sécurité. En effet, ce matériau composite constitué de deux ou plusieurs plis de verre intercalés avec des feuilles de polymère, e.g. du poly(butiral de vinyle) (PVB), est très résistant à la perforation tout en assurant la sécurité des utilisateurs en retenant les fragments de verre formés sous une charge dynamique du fait de l'adhérence verre-PVB. Les mécanismes de dissipation permettant une telle résistance à l'impact ont été identifiés grâce à des montages simples, et sont principalement le délaminage entre le verre et l'intercalaire couplé à un étirement important du polymère viscoélastique. On reproduit ici un impact sur verre feuilleté à l'aide d'un impacteur sphérique rigide. Une technique de stéréo-corrélation d'images numériques (S-CIN) exploitant la symétrie de l'essai est utilisée pour mesurer, d'une part, les champs cinématiques et la géométrie de la demi-face arrière de l'échantillon impacté, et d'autre part, l'évolution de la fissuration. La géométrie prise par le feuilleté cassé ouvre la voie à une prédiction quantitative de la quantité de travail absorbable par le feuilleté et donc de ses performances anti-perforation.

Abstract

Laminated glass is the material of choice for the window manufacturers. Indeed, in addition of its impeccable optical properties, this material constituted of two or more glass sheets interleaved via polymeric layers, e.g. poly-vinyl butyral (PVB), is very resistant to perforation, while ensuring the user safety by avoiding the large glass fragments to detach, thanks to a high enough level of glass-PVB adhesion. The dissipative mechanisms of this composite material have been previously identified : they rely on the delamination between the layers and the large stretching of the viscoelastic interlayer. It is proposed hereafter to reproduce a blunt and rigid-body impact on a laminated glass plate. A stereo-digital image correlation (S-DIC) technique measures the back surface sample movement. The fragmented sample 3D shape and kinematic is described throughout the test, in relation with the glass cracking pattern evolution. The shape of the broken laminated glass paves the way towards a quantitative prediction of the amount of work that a laminated glass can absorb before perforation.

Mots clés : Verre feuilleté, Fragmentation sous impact, Stéréo-vision rapide, Essai dynamique.

1 Introduction

Le verre feuilleté, constitué d'au moins deux plis de verre unis à l'aide d'un intercalaire en polymère, souvent du Polybutyral vinylique (PVB), est utilisé comme vitrage dans plusieurs domaines tels que l'automobile ou le bâtiment en raison de ses bonnes propriétés optiques, mécaniques et acoustiques. Principalement, lors d'un impact suivi d'une fissuration du verre, le composite peut assurer la sécurité des personnes en retenant les fragments de verre créés et empêcher la perforation, prévenant ainsi les chutes de personnes dans le vide ou bien l'effraction. La résistance à l'impact est donc d'une importance capitale pour le verre feuilleté. Cette propriété est sensible à plusieurs paramètres dont les caractéristiques mécaniques du verre et du PVB et également à l'adhésion entre les plis du composite.

Lors d'un impact tel que la chute d'une bille en acier sur une plaque en verre feuilleté, comme défini dans la norme *EN 356* [1], une fissuration de plus en plus dense précède une phase de grande déformation macroscopique de la plaque. Cette dernière est due à l'étirement et au délaminage de l'intercalaire, phénomènes responsables de la majeure partie de la dissipation d'énergie lors d'un impact [2, 3]. L'étude de tels impacts représentant des situations de la vie courante : accident de voiture, chute de corps... peut être reproduit en laboratoire à l'aide de montages instrumentés [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Plutôt que de répliquer directement la norme *EN 356* à l'aide d'une tour de choc, le banc d'essai "canon" [2, 11], étudié ici, présente l'avantage de reproduire les conditions de sollicitation lors de l'impact à 10 m/s environ entre un verre feuilleté et un corps en acier de 4,3 kg. Les plaques de verre feuilleté utilisées pour les essais mesurent 300 mm×300 mm et sont d'épaisseurs variables, allant d'un à plusieurs dizaines de millimètres, ce qui rend le montage plus commode d'utilisation que la tour de choc utilisée dans la norme *EN 356* et sa plaque de verre feuilleté de 1 m². Le banc "canon" (figure 1) se compose d'un projectile et d'un impacteur au corps cylindrique terminé par une demi-sphère de rayon 50 mm en acier, reproduisant la géométrie de l'impact *EN 356* qui utilise des sphères d'acier ayant le même rayon. Une mesure du mouvement du plan médian de la demi-sphère est réalisée à l'aide d'un télémètre échantillonné à haute fréquence. L'espace autour du banc d'essai permet également l'installation de plusieurs caméras rapides synchronisées offrant différentes vues de la déformation 3D de l'échantillon.

On propose ici d'étudier le comportement dynamique du verre feuilleté à l'aide d'un essai instrumenté sur le banc "canon", en ajoutant un suivi en stéréo-vision à l'aide de caméras rapides dans le but de suivre la déformation de la surface du verre au cours de l'essai, puis de reconstituer son évolution dans l'espace et dans le temps. Ces données seront mises en relation avec des résultats obtenus lors d'essai de traction sur des languettes de verre feuilleté entaillées, *i.e. Through Crack Tensile (TCT)* test [12, 13, 14] afin de calculer l'énergie dissipée entre les lèvres de fissures du verre par intégration des résultats du TCT sur l'aire créée lors de la grande déformation macroscopique de la plaque.

La mesure par stéréo-vision est réalisée à l'aide de caméras rapides dont les images sont traitées en stéréo-corrélation d'images numériques [15, 16] (S-CIN) globale, ce qui permet de suivre le mouvement d'un maillage aux éléments finis lors des grandes déformations de la plaque fragmentée. Ce maillage, initialement défini à l'aide des dimensions du banc et de l'échantillon, se déforme au cours de l'essai, et pour chaque image, une nouvelle surface tridimensionnelle du verre est mesurée [17]. Les grandes rotations de la surface induisent des variations de niveaux de gris très significatives (réflexions parasites

des sources de lumière), qui limitent la durée pendant laquelle les résultats sont fiables. L'exploitation de l'axisymétrie de la géométrie de l'essai, permet d'étendre significativement cette durée.

2 Banc d'essai et Technique expérimentale

2.1 Montage "canon"

Développé au cours de la thèse d'Emmanuel Nourry [2], le banc d'essai "canon" présente une alternative à l'utilisation de la tour de choc lors de la réalisation d'essai d'impact sur le verre feuilleté. Inspiré de la norme *EN 356* [1], il permet de reproduire l'impact entre un impacteur contondant en acier de 4.3 kg et un échantillon de verre feuilleté de 300mm×300mm, sur une gamme de vitesse pouvant aller jusqu'à 15 m/s. L'influence de plusieurs paramètres, pouvant être plus ou moins liées au caractère aléatoire du motif de fissuration obtenu sur le verre, est étudiée dans la thèse de Decourcelle [11].

Lors d'un tir avec le dispositif, un projectile est mis en mouvement par un actionneur à air comprimé. Celui-ci transmet sa quantité de mouvement à l'impacteur initialement fixe. Sa course de 2 cm avant de rencontrer le verre feuilleté permet à l'impacteur d'obtenir une vitesse initiale stabilisée de 8.28 m/s dans l'essai analysé par la suite (figure 1).

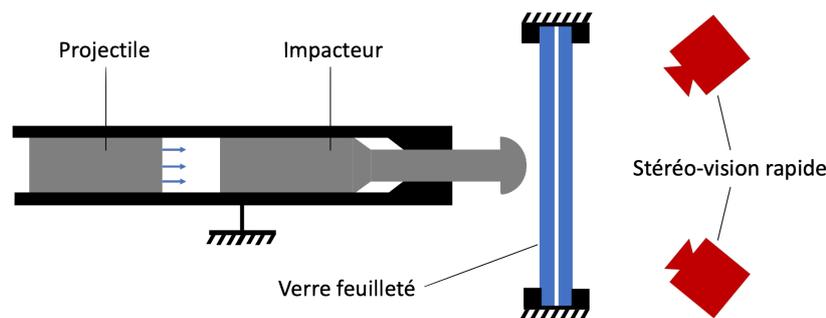


FIGURE 1 – Schéma du système "canon".

Lors des premières microsecondes après le contact entre la sphère et l'échantillon, le feuilleté se déforme de manière élastique. Ensuite une zone de comminution est créée juste au droit de l'impact. Des fissures radiales et orthoradiales apparaissent sur les plis de verre, respectivement causées par la présence de contraintes orthoradiales et radiales importantes. Cela crée un motif de fissuration, où se concentrent les grandes déformations où le PVB est étiré et où le délaminage entre les différents plis se produit. Si l'énergie cinétique initiale de l'impacteur est suffisante, le déchirement de l'intercalaire s'opère sous la tête d'impact, et la perforation du feuilleté survient.

Contrairement à la tour de chute, difficile à instrumenter, le banc "canon" (figure 2) est équipé d'une mesure de déplacement à 30 kHz de la surface plane de la demi-sphère, permettant de mesurer la vitesse de l'impacteur par différences finies. L'ajout de caméras rapides permet également de suivre l'intégralité de l'essai avec une résolution temporelle autour de 30 kHz.

Après une phase d'étalonnage des caméras et à l'aide de l'application d'un mouchetis sur la face observée du verre feuilleté, il est possible de venir mesurer des champs cinématiques de l'échantillon par S-CIN.

2.2 Essais de délaminage : *Trough Crack Tensile (TCT) test*

Lors d'impacts sur le verre feuilleté, les fragments de verre adhèrent à l'intercalaire en PVB. La dissipation d'énergie de l'impact est contrôlée par deux mécanismes couplés : la dissipation viscoélastique

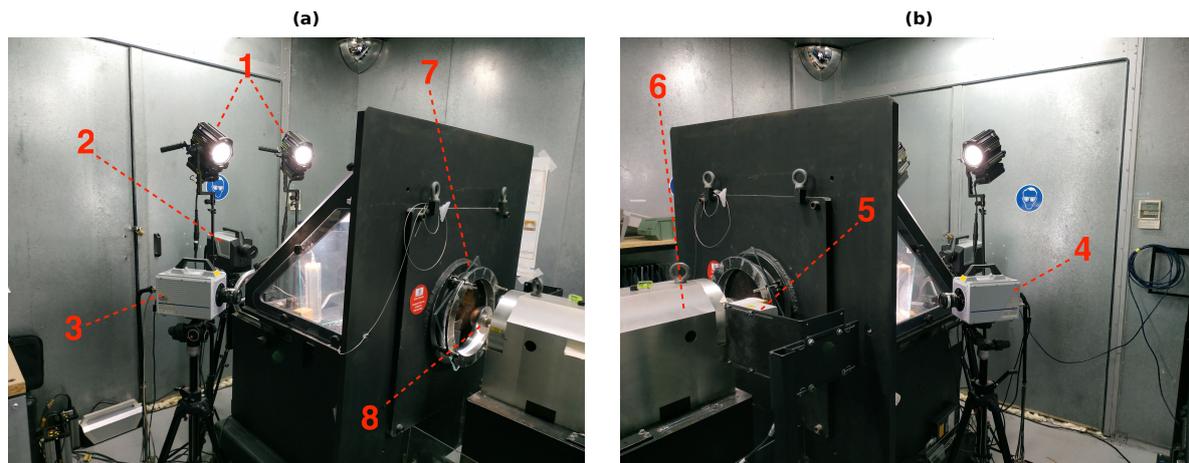


FIGURE 2 – Installation pour la stéréo-vision : 1 Spots lumineux de 400W. 2 Shimadzu[®] HPV-X2. 3 Photron[®] SA-5 (focale de 24 mm) de droite. 4 Photron[®] SA-5 de gauche. 5 Télémètre. 6 canon. 7 Verre feuilleté encasté par un hublot de diamètre 28 cm. 8 Demi-sphère de l’impacteur.

par étirement de l’intercalaire et le délaminage du PVB et des fragments de verre. Des essais de traction sur verre entaillé (*TCT tests*) sont réalisés, permettant de comprendre le mécanisme de délaminage dans le cadre de l’impact sur le banc “canon” par exemple [12, 13, 14]. A vitesse d’étirement constante, les auteurs ont constaté l’apparition d’un palier de force en régime établi, pour lequel l’avancée du front de délaminage sur les deux parties des plis de verre est proportionnel à l’espacement des plis de par et d’autre de l’entaille. Dans le cadre d’essais sur le “canon”, on se situe rapidement sur ce plateau de force, mais l’énergie dissipée dépend de beaucoup de paramètres incluant le motif de la fissuration, la géométrie des plis et des conditions aux limites. Il est donc souhaitable d’exploiter une mesure des champs cinématiques des plis de verre feuilleté pour déterminer les vitesses d’étirement au droit des fissures, et ainsi se rapprocher du modèle de dissipation proposé dans le cadre du *TCT test*.

2.3 Stéréo-corrélation d’images numériques (S-CIN) dans une base réduite

Pour faire une mesure par stéréo-vision de l’essai dynamique, il est nécessaire de réaliser un mouchetis sur la face arrière du verre. Il est réalisé à l’aide d’une peinture élastomère pouvant supporter de grandes déformations sans influencer le comportement de la plaque lors de l’impact. Les caméras sont synchronisées avec la mesure par télémètre de l’impacteur, démarrées simultanément à l’aide d’une barrière optique située en amont de l’échantillon.

La mesure de champs est réalisée de manière globale, c’est-à-dire que l’on vient interpréter la variation de niveaux de gris des images par un déplacement 3D d’un maillage éléments finis de la partie mouchetée observée [16]. Le problème étant mal conditionné, de par la résolution du problème par CIN et de par les grandes variations de brillance et contraste ainsi que l’apparition de fissures sur la plaque. On exploite donc l’axisymétrie du banc d’essai pour restreindre a priori les degrés de liberté du maillage aux éléments finis et ainsi faire converger le déplacement entre deux images. L’origine est choisie au centre de la plaque, et l’axe du “canon” correspond à l’axe hors plan (axe *Z*) de nos mesures (figure 3). Un papier de soie est utilisé pour masquer l’arrière-plan lors de l’essai.

Pour se rapprocher du modèle réalisé sur les essais *TCT*, il est nécessaire d’évaluer les champs de déplacement et vitesse de notre éprouvette au cours de l’essai. On combine ces mesures avec l’observation de

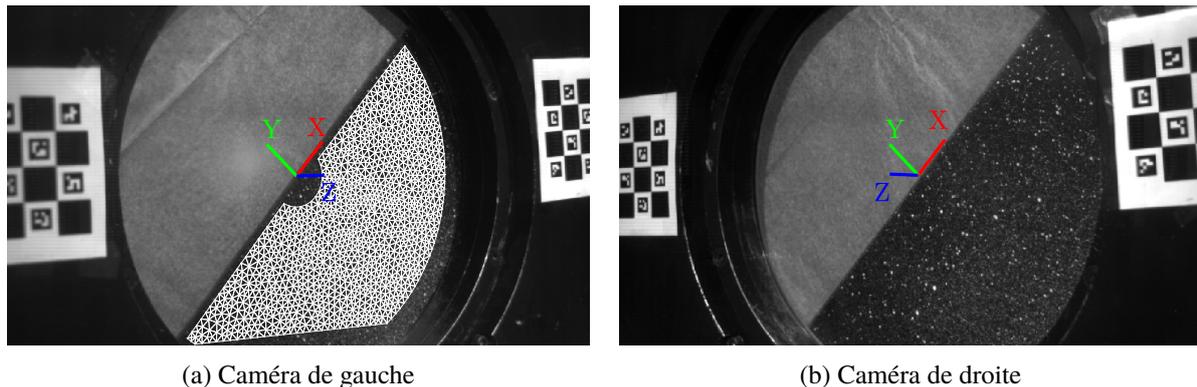


FIGURE 3 – Vues des caméras. Coordonnées globales représentées sur les images. Le maillage est projeté sur la vue de gauche et le mouchetis reste visible sur la vue de droite.

la formation des fissures sur la surface non mouchetée du verre feuilleté. Le champ de vitesse est obtenu par différences finies du champs de déplacement.

3 Résultats

On traite ici de l'analyse des 3 premières millisecondes d'un essai d'impact sur verre feuilleté réalisé sur le banc d'essai "canon", la durée totale de l'impact (jusqu'à perforation) étant d'environ 15 ms. La vitesse initiale de l'impacteur est de 8.28 m/s dans cet essai, ce qui correspond à une énergie cinétique avant impact de 160 J. Trois instants sont représentés figures 4, 5 et 6, correspondant respectivement à 0.63 ms, 1.63 ms et 2.63 ms après l'impact entre la demi-sphère et le verre. Sur les figures sont présentés, (a)-(b) les images prises par les caméras rapides, (c) le champ de déplacement sur la surface 2D initiale et (d) sur la déformée 3D. (e)-(f) correspondent aux résidus de corrélation d'images. (g)-(h) montrent les résidus bruts entre la surface initiale non-mouchetée et la surface courante non-mouchetée déformée. Ceci est rendu possible grâce à l'hypothèse d'axisymétrie qui permet de déformer la partie non mouchetée du maillage avec la même cinématique que celle de la partie mouchetée où est effectuée la mesure. Sur ces images on voit clairement apparaître les fissures formées dans les plis de verre. Celle-ci sont mesurées pour un certain rayon et une certaine position angulaire, ce qui permet d'estimer la densité de fissure sur la plaque. Les images sont encodées sur 8 bits, soit un niveau de gris (GL) maximum de 255.

Dès les premières microsecondes, des fissures radiales sont amorcées à partir du point d'impact et se propagent jusqu'aux bords de l'échantillon. Les fissures orthoradiales surviennent plus tard, mais sont presque toutes présentes au bout d'une milliseconde. Lorsqu'une fissure est créée, comme il y a toujours adhésion entre les fragments de verre et l'intercalaire en polymère, la plaque s'étire en grande déformation au droit des fissures nouvellement formées. En ces endroits, l'étirement du PVB et le délaminage interviennent, d'où les grandes déformations mesurées figure 6d. Pour cet essai, on remarque une évolution globalement conique du déplacement de la plaque, en se concentrant sur un disque de rayon décroissant de 140 à 80 mm, soit la zone présentant une forte densité de fissures circulaires. A un stade avancé c'est en effet le centre de la plaque correspondant à la zone densément fissurée qui se déforme plus que l'extérieur.

Une variation de brillance importante est visible sur les résidus de corrélation d'images (e)-(f) au cours des grandes déformations du feuilleté fissuré. En particulier une variation des niveaux de gris suivant la

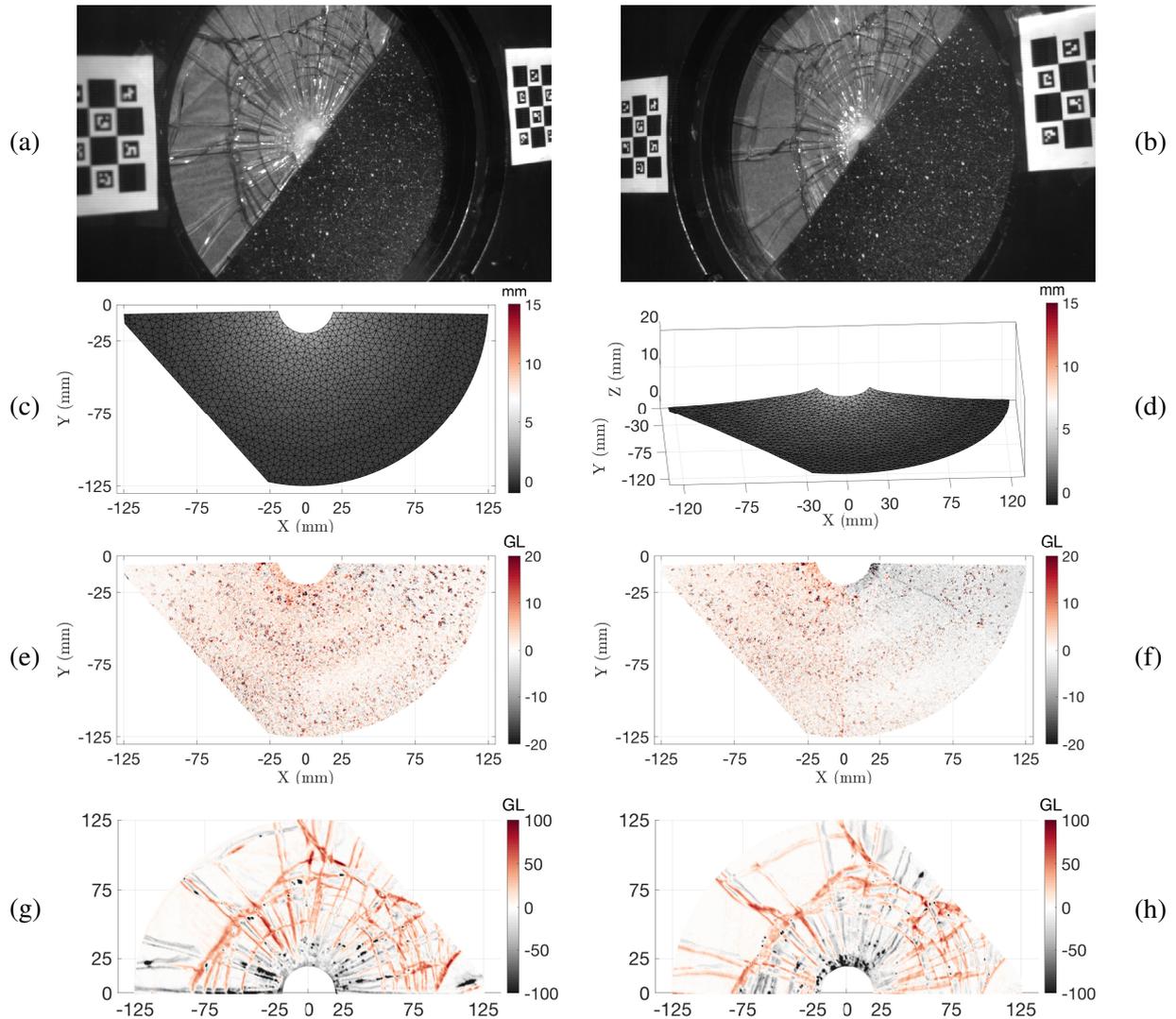


FIGURE 4 – Mesures par S-CIN axisymétrique à $t=0.63$ ms (*i.e.* image 20) : (a)-(b) Images stéréo. Déplacement hors-plan sur la surface de référence (c) et déformée (d). Les résidus de corrélation d'images (e)-(f). Les résidus de la zone non-mouchetée pour la lecture de la fissuration (g)-(h).

direction orthoradiale peut être interprétée comme un mouvement local de flexion le long d'une fissure radiale, la rendant très visible sur le champ de résidus (voir figure 6f) alors qu'elles ne sont pas lisibles sur les images brutes.

Comme le mouvement est décrit dans une base cylindrique, les champs peuvent être représentés simplement suivant la position radiale initiale du nœud. Sur la figure 7 sont montrés les déplacements (a) hors plan, (b) radiaux et (c) la norme de la vitesse déterminée par différences finies du champ de déplacement. Une interpolation est réalisée au centre de la plaque ($R=0$ mm) où l'on impose la cinématique de l'impacteur mesuré avec le télémètre. Sur le bord encasté ($R=140$ mm), on impose un déplacement et une vitesse nulle. Concernant le déplacement hors plan (figure 7a), on remarque une déformée conique de 25 mm à 140 mm de rayon qui se scinde en 2 cônes avec un pivot autour de 80 mm de rayon à partir de 1,5 ms. Cela est confirmé par l'évolution de la vitesse du profil (figure 7c) qui atteint globalement un maximum autour de 1,5 ms, puis décroît plus fortement avec le rayon. Le mouvement radial (figure 7b) est dirigé du centre vers l'extérieur, en cohérence avec l'augmentation attendue de l'aire de la surface

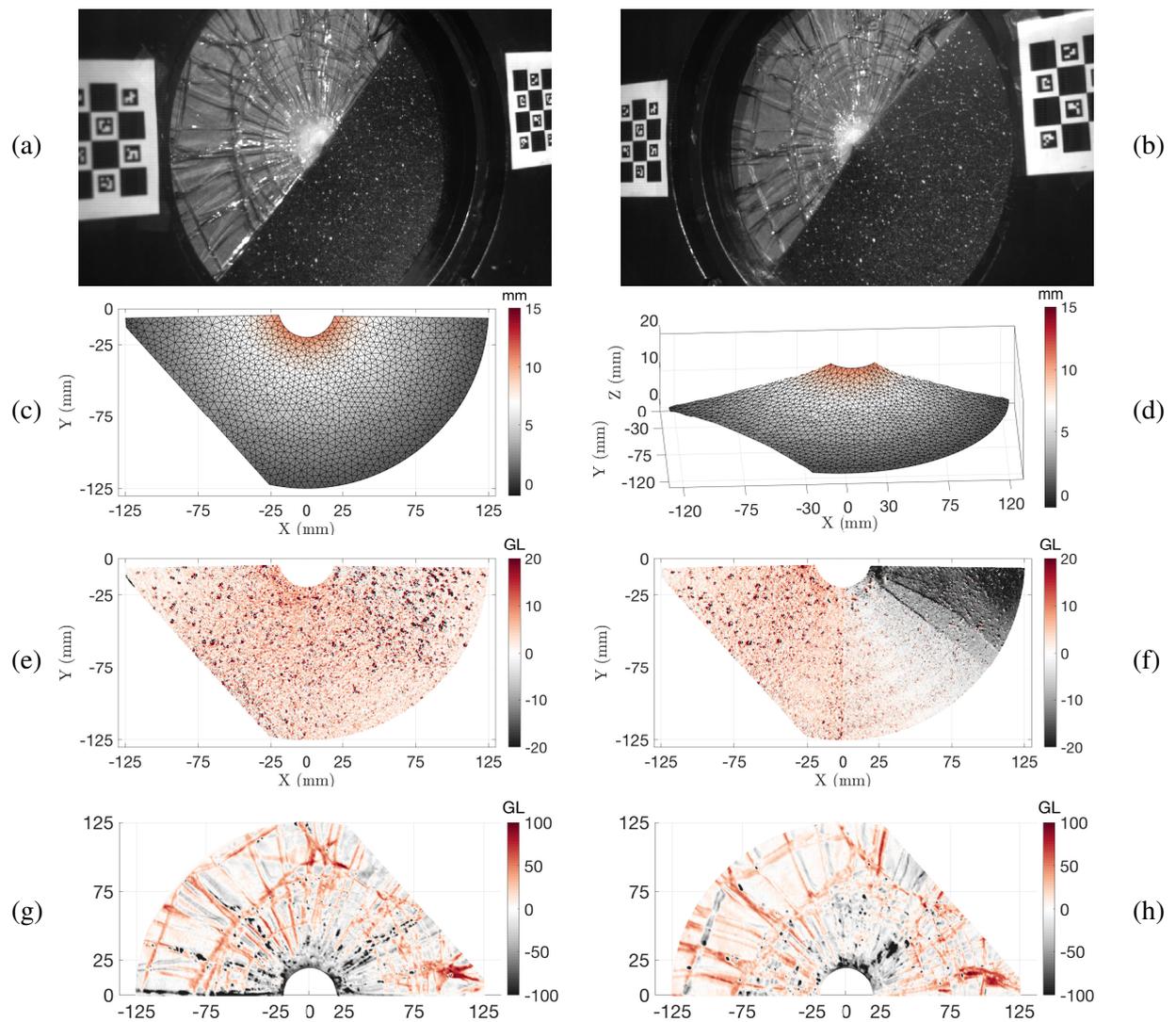


FIGURE 5 – Mesures par S-CIN axisymétrique à $t=1.63$ ms (*i.e.* image 50) : (a)-(b) Images stéréo. Déplacement hors-plan sur la surface de référence (c) et déformée (d). Les résidus de corrélation d'images (e)-(f). Les résidus de la zone non-mouchetée pour la lecture de la fissuration (g)-(h).

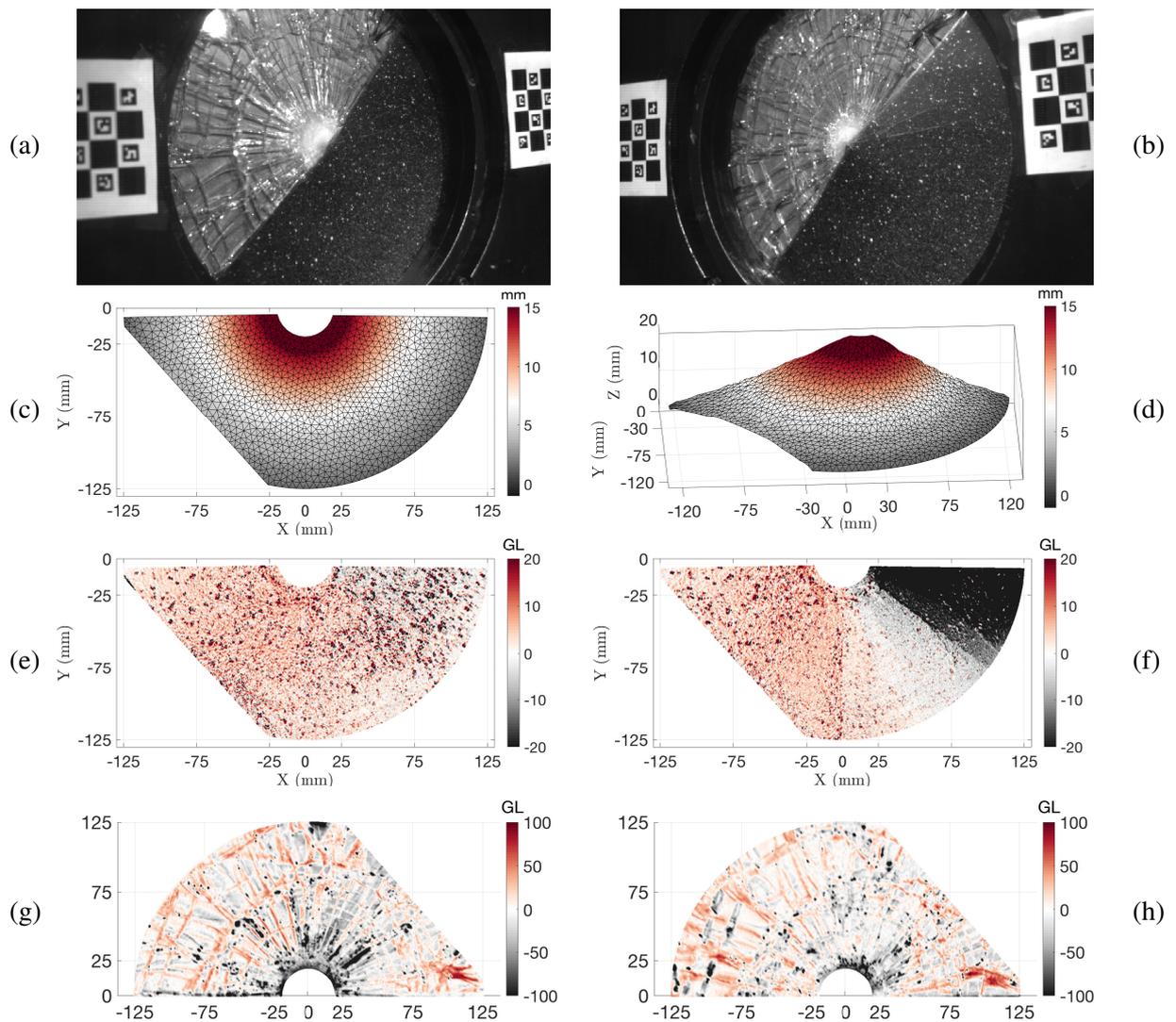
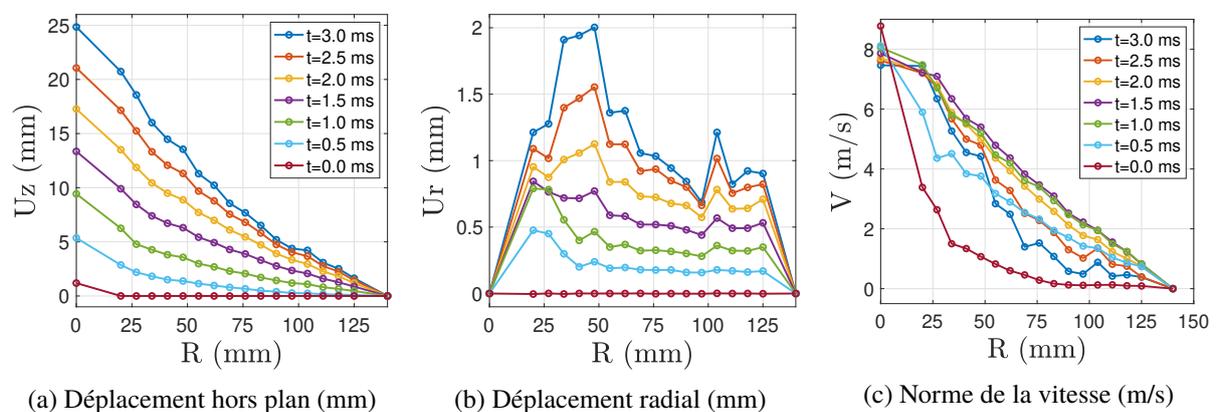


FIGURE 6 – Mesures par S-CIN axisymétrique à $t=2.63$ ms (*i.e.* image 80) : (a)-(b) Images stéréo. Déplacement hors-plan sur la surface de référence (c) et déformée (d). Les résidus de corrélation d'images (e)-(f). Les résidus de la zone non-mouchetée pour la lecture de la fissuration (g)-(h).



(a) Déplacement hors plan (mm)

(b) Déplacement radial (mm)

(c) Norme de la vitesse (m/s)

FIGURE 7 – Mesures de champ en fonction du rayon à différents instants, par S-CIN axisymétrique.

du verre feuilleté. Le déplacement radial est plus élevé pour des rayons plus petit, jusqu'à une taille caractéristique environ égale à la taille de la demi-sphère.

4 Conclusion

Dans cet article, une mesure de champs cinématiques 3D à l'aide de la stéréo-corrélation d'images numériques est réalisée sur des essais de fragmentation du verre feuilleté sous impact. Grâce à une définition a priori de la cinématique dans une base axisymétrique, il est possible de mesurer la déformée et la vitesse de déformation de la face arrière de l'échantillon. Les fissures radiales et circulaires formées sur la face du verre laissée transparente sont également mesurables par cette méthode.

Ces multiples mesures peuvent être mises en relation avec les données récoltées sur des essais de traction de feuilleté entaillés (*TCT*), à savoir le lien entre la vitesse de déformation de la plaque et la progression des fronts de délaminage entre fragments de verre et PVB ainsi que l'énergie dissipée par surface ouverte entre les lèvres de fissure du verre, ce afin de calculer l'énergie dissipée par le feuilleté en intégrant ces résultats sur l'aire créée lors de la grande déformation macroscopique de la plaque.

Remerciements : Saint-Gobain et l'ENS Paris-Saclay pour avoir aidé la réalisation des essais sur le dispositif "canon", conduits par Maxime Da Rocha, Keyvan Piroird, René Gy, Benoît Voillot et François Hild pour leurs conseils. Projet financé dans le cadre du dispositif CIFRE de l'ANRT.

Références

- [1] Norme Européenne. NF EN 356. Verre dans la construction – Vitrage de sécurité – Mise à essai et classification de la résistance à l'attaque manuelle, Septembre 2000.
- [2] E. Nourry. *Laminated glass behaviour under perforating impact*. PhD, Arts et Métiers, 2005.
- [3] P. Elzière. *Laminated glass : dynamic rupture of adhesion*. PhD, Paris VI, 2016.
- [4] G. Yu et al. Computation modeling of laminated crack glass windshields subjected to headform impact. *Computers & Struct*, 193 :139 – 154, 2017.
- [5] P. Del Linz et al. Delamination properties of laminated glass windows subject to blast loading. *Int J Impact Eng*, 105 :39–53, 2017.
- [6] I. Mohagheghian et al. Predicting indenter nose shape sensitivity for quasi-static perforation of thin metallic plates. *Eur J Mech - A/Solids*, 63 :165–186, 2017.
- [7] Y. Li et al. Dynamic mechanical behavior and pedestrian safety characteristics of toughened laminated windshield. *Composites Part B : Eng*, 163 :740 – 751, 2019.
- [8] X. Wang et al. Post-fracture performance of laminated glass panels under consecutive hard body impacts. *Composite Struct*, 254 :112777, 2020.
- [9] A. A. Nassr et al. Experimental investigation on damage and wave propagation of pvb laminated glazing structures under impact loading. *Structures*, 29 :966–978, 2021.
- [10] H. Kim et al. Numerical prediction of dynamic fracture strength of edge-mounted non-symmetric tempered glass panels under steel ball drop impact. *J Mater Res and Technol*, 17 :270–281, 2022.
- [11] R. Decourcelle. *Comportement mécanique des vitrages feuilletés sous chargements statiques et dynamiques*. PhD, Rennes 1, 2011.

- [12] M. Seshadri et al. Mechanical response of cracked laminated plates. *Acta Materialia*, 50(18) :4477 – 4490, 2002.
- [13] P. Elzière et al. Large strain viscoelastic dissipation during interfacial rupture in laminated glass. *Soft Matter*, 13 :1624–1633, 2017.
- [14] P. Fourton et al. Adhesion rupture in laminated glass : influence of adhesion on the energy dissipation mechanisms. *Glass Struct & Eng*, 5 :397–410, 2020.
- [15] M. A. Sutton, J. Orteu, and H. Schreier. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements : Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer, 1st edition, 2009.
- [16] J. Dufour et al. Shape, displacement and mechanical properties from isogeometric multiview stereocorrelation. *J Strain Analysis for Eng Des*, 50(7) :470–487, 2015.
- [17] J. Pierré et al. Finite element stereo digital image correlation : Framework and mechanical regularization. *Exp Mech*, 57 :443–456, 2017.