

Validation de la déflectométrie pour la caractérisation des ondes élastiques auto-émises par l'avancée des fronts de fissures dans les matériaux fragiles

W. Saadi^{1,2}, T. Heuzé¹, R. Seghir²

¹ IRDL, UMR CNRS 6027, Bretagne INP, Brest, wissam.saadi@enib.fr

² GeM, UMR CNRS 6183, Nantes Université, Centrale Nantes

Résumé — Ce travail, mené dans le cadre du projet ANR IPERFrag, valide la déflectométrie comme technique de mesure plein champ pour la mesurer les déplacements hors-plan nanométriques générés par l'émission d'ondes élastiques lors de l'avancée des fronts de fissures dans les matériaux fragiles. Une stratégie de validation numérique basée sur un jumeau numérique (Blender) permet de valider la chaîne de mesure complète avec quantification des incertitudes pour des applications de rupture du PMMA. Les résultats démontrent une sensibilité nanométrique et établissent les limites opérationnelles de la méthode. **Mots clés** — Déflectométrie, Fracture dynamique, PMMA, Ondes élastiques, Mesure plein champ.

1 Contexte et objectifs

Lors de la fragmentation fragile, l'avancée des fronts de fissures émettent des ondes élastiques d'amplitudes de déplacements nanométriques qui se propagent à travers le matériau sur des échelles de l'ordre de la microseconde. La caractérisation des phénomènes mécaniques liés à l'ouverture dynamique de fissures, notamment dans la process zone, nécessite des techniques de mesure capables de capturer des déplacements hors-plan d'amplitudes extrêmement faibles (100 à 1000 nm) tout en maintenant une couverture spatiale complète.

Ce travail s'inscrit dans le projet ANR IPERFrag et vise à valider la déflectométrie pour la détection des ondes élastiques auto-émises par l'avancée des fronts de fissures dans le PMMA. L'objectif est de développer un pipeline de mesure robuste avec quantification des incertitudes et d'établir les protocoles expérimentaux nécessaires pour capturer les signatures d'ondes durant la rupture dynamique.

2 Principe de la déflectométrie

2.1 Fondements de la méthode

La déflectométrie basée sur la méthode de grille [3] mesure les pentes hors-plan liées à la déformation d'une surface miroir en projetant un motif périodique connu sur un spécimen spéculaire et en enregistrant sa réflexion avec une caméra [2]. Toute inclinaison locale de la surface produit un décalage latéral des lignes de grille réfléchies dans le plan de l'image (Figure 1).

Il est crucial de distinguer le *déplacement apparent de la grille* (décalage latéral observé dans l'image caméra) du *déplacement hors-plan réel* (variations tridimensionnelles $h(x,y)$ de la surface du spécimen). Le premier est directement mesuré dans le plan de l'image, le second est obtenu après conversion en pentes puis intégration [5].

2.2 Chaîne de calcul complète

Le pipeline de déflectométrie se décompose en cinq étapes séquentielles (Figure 2) :

1. Extraction des phases : Une Transformée de Fourier Fenêtrée (WFT) appliquée aux images de grille produit des cartes de phase enroulées $\varphi_x(x,y)$ et $\varphi_y(x,y)$ [3]. Le déphasage entre états de référence et déformé s'écrit :

$$\Delta\varphi_x(x,y) = \varphi_{def,x}(x,y) - \varphi_{ref,x}(x,y) \quad (1)$$

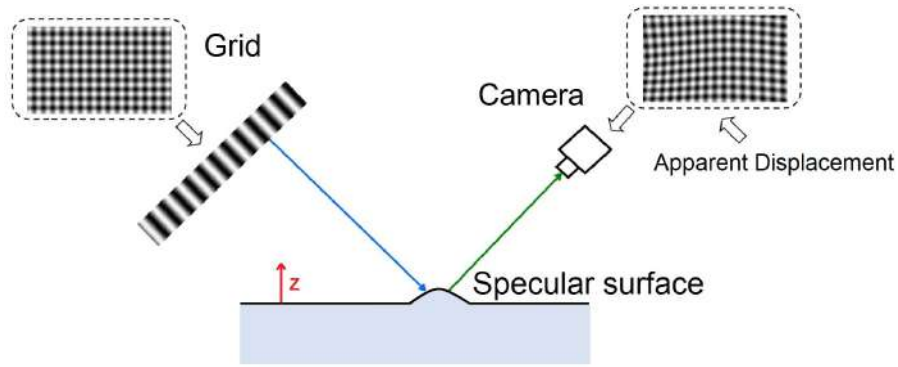


FIGURE 1 – Principe de la déflectométrie : configuration expérimentale montrant la projection de lumière sur une grille, le spécimen avec ses propriétés de réflexion spéculaire et la caméra, avec un exemple de motifs de grille de référence de géométrie connue (gauche) vs. déformée illustrant les déphasages (droite). dans le plan de l'image

2. Estimation initiale : La relation phase-déplacement apparent s'écrit pour des petites déplacements comme suit :

$$u_x^{(0)} = -\frac{P}{2\pi}\Delta\phi_x, \quad u_y^{(0)} = -\frac{P}{2\pi}\Delta\phi_y \quad (2)$$

où p est le pas de la grille et un changement de phase de 2π radians correspond à un décalage d'une période.

3. Raffinement itératif : Pour les grandes déplacements, un schéma itératif corrige l'estimation en interpolant la phase déformée vers l'échantillonnage référence jusqu'à convergence [6].

4. Conversion phase-pente : Les considérations géométriques relient le décalage de frange à l'inclinaison. Pour une distance caméra-spécimen H et de petits angles, on a :

$$\theta_x = \frac{P}{4\pi H}\Delta\phi_x, \quad \theta_y = \frac{P}{4\pi H}\Delta\phi_y \quad (3)$$

5. Intégration : Nous proposons ici l'utilisation d'un algorithme de Frankot-Chellappa pour reconstruire le champ de déplacement hors-plan $h(x, y)$ à partir des pentes θ_x et θ_y via une approche dans le domaine de Fourier imposant des contraintes d'intégrabilité [7].

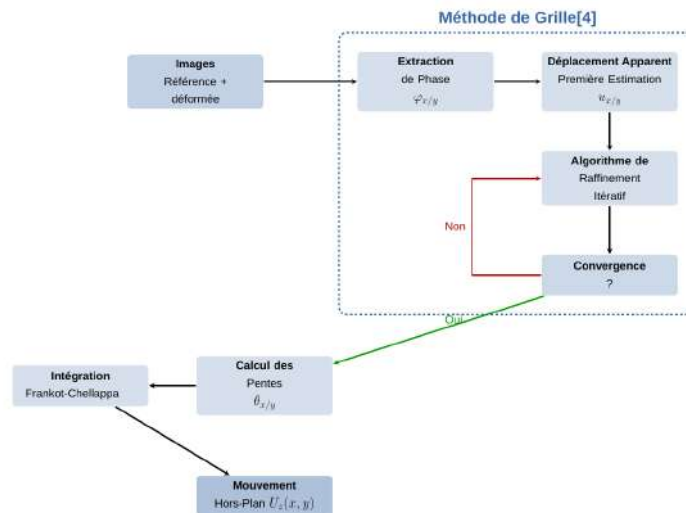


FIGURE 2 – Chaîne de calcul complète de la déflectométrie depuis l'acquisition d'images jusqu'à la reconstruction du déplacement hors-plan.

2.3 Validation préliminaire sur données synthétiques

Des tests préliminaires ont été conduits sur des grilles synthétiques déformées analytiquement (gradients uniformes, ondes gaussiennes, fonctions échelon) pour valider les algorithmes de traitement d'image

et établir les limites opérationnelles de la méthode.

Le déphasage local ne doit pas excéder $\pm 1,5 \times 2\pi$ radians (soit $\pm 1,5$ périodes de grille) sous peine de perdre l'algorithme de déroulement de phase, ce qui impose une limite sur la pente maximale de la déformation mesurable. Par ailleurs, pour capturer fidèlement une déformation, sa largeur caractéristique doit s'étendre sur au moins 3 périodes de grille. Par exemple, considérons un profil gaussien de déplacement hors plan d'amplitude A et de largeur caractéristique σ : si $A \approx p$ (une période de grille), alors $\sigma \geq 3p$ est requis. Pour un pas de grille $p = 1$ mm, une amplitude de déplacement apparent de 1 mm nécessite une largeur minimale de $\sigma \geq 3$ mm.

3 Validation par jumeau numérique

3.1 Stratégie ciblée pour le PMMA

Dans un premier temps, des variations analytiques de la topographie (profils gaussiens, ondes planes), en accord avec les caractéristiques visées pour le PMMA, sont testées via le jumeau numérique. La suite du travail présente des résultats préliminaires basés sur ces déformations idéalisées. Des rendus s'appuyant sur des simulations numériques de fissurations avec prise en compte des biais expérimentaux (bruit optique, aberrations) sont actuellement en cours d'analyse et feront l'objet de communications ultérieures.

La littérature sur la rupture fragile du PMMA révèle des caractéristiques typiques d'ondes élastiques :

- Amplitude hors-plan maximale : 100 à 1000 nm
- Caractéristiques spatiales : largeur $\sigma = 0.1$ à 3 mm
- Échelles temporelles : évolution microseconde

Cette approche permet une validation focalisée utilisant des profils contrôlés répliquant les signatures essentielles d'ondes induites par fissure.

3.2 Configuration du jumeau numérique dans le logiciel Blender

Le système de déflectométrie virtuel recrée la configuration expérimentale complète via un ray-tracing photoréaliste (Figure 3). Les paramètres de configuration sont :

- Surface déformée : profil gaussien $h(x, y) = A \exp(-r^2/2\sigma^2)$
- Amplitude A : 10 nm, Largeur σ : 1,2 mm
- Distance miroir : 1 m, zone de mesure : 30×30 mm
- Résolution image : 1400×1400 pixels
- Grille : 16 périodes, pas physique $p = 1$ mm

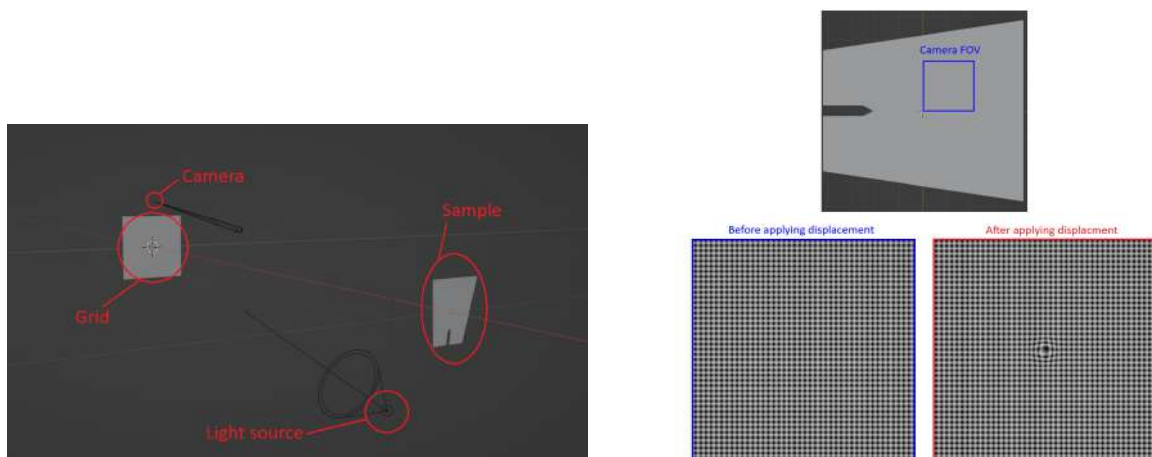


FIGURE 3 – Environnement virtuel Blender : (gauche) configuration 3D montrant la source de lumière et la grille, la surface miroir et le positionnement de la caméra, (droite) L' image est rendue photoréaliste avec réflexion de la grille depuis la surface non déformée vers la déformée.

Le jumeau numérique permet un contrôle précis du champ de déplacement appliqués (données de

référence) tout en simulant les conditions optiques via le moteur de rendu Cycles de Blender. Cette approche valide la chaîne complète depuis l'acquisition jusqu'à la reconstruction.

3.3 Résultats de validation

La validation du pipeline complet démontre une capacité à capturer des perturbations nanométriques avec une précision élevée. Pour une perturbation gaussienne de 10 nm d'amplitude et 1,2 mm de largeur caractéristique, l'erreur RMS obtenue est égale à 4% (Figure 4), même pour cette très faible amplitude. Ces résultats, obtenus sans bruit ajouté, établissent la limite de sensibilité fondamentale de la méthode et confirment la robustesse de la chaîne de calcul pour la détection de déplacements hors-plan à l'échelle nanométrique.

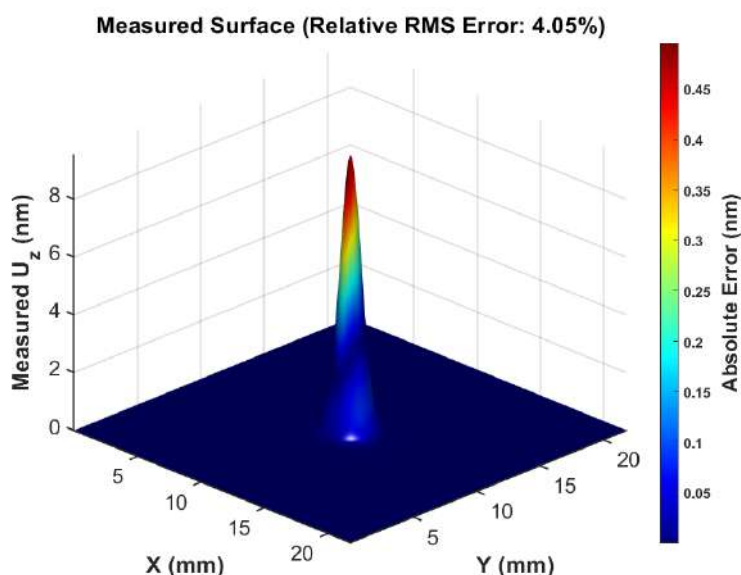


FIGURE 4 – Validation sur perturbation gaussienne nanométrique : reconstruction déplacement hors-plan mesuré colorée par erreur locale, montrant une erreur RMS relative =4% pour amplitude=10 nm, $\sigma=1,2$ mm.

4 Conclusions et perspectives

Ce travail valide la déflectométrie comme technique de mesure plein champ pour la caractérisation d'ondes élastiques émises par l'avancée de fronts de fissures dans les matériaux fragiles. Une stratégie basée sur la construction d'un jumeau numérique dans le logiciel Blender a permis de tester la chaîne complète de mesure avec des données de référence.

Les tests préliminaires démontrent une capacité à capturer des déplacements hors-plan de l'ordre de 10 nm avec une erreur RMS relative de 4% en l'absence de bruit. Ces résultats établissent les limites de précision fondamentales de la méthode et sont cohérents avec les amplitudes attendues pour les ondes élastiques se propageant dans le PMMA lors de la rupture dynamique.

La suite naturelle de ce travail comprend trois étapes :

- Quantification des incertitudes : estimation de l'influence du bruit généré par le capteur, des aberrations optiques et des paramètres de configuration sur la précision de mesure via le jumeau numérique
- Validation numérique avancée : application de la chaîne de mesure à des simulations numériques de propagation d'ondes dynamiques issues de modèles de fissuration pour confronter la méthode à des signatures réalistes d'ondes élastiques
- Application expérimentale : une fois l'ensemble des incertitudes caractérisées, la stratégie sera appliquée à des essais de fissuration instrumentés en imagerie ultra-rapide pour capturer les signatures d'ondes durant la propagation de fissure

Les capacités démontrées positionnent la déflectométrie comme une technique complémentaire à fort potentiel pour la caractérisation expérimentale des phénomènes de rupture dynamique.

Références

- [1] L.B. Freund. *Dynamic fracture mechanics*, Cambridge University Press, 1998.
- [2] Y. Surrel. *Fringe analysis*, Topics in Applied Physics, 77 :55-102, 2000.
- [3] M. Grédiac et al. *The grid method for in-plane displacement and strain measurement*, Strain, 52(3) :205-243, 2016.
- [4] Devivier et al. (2016). *Time-resolved full-field imaging of ultrasonic Lamb waves using deflectometry*. Experimental Mechanics, 56(3), 345-357.
- [5] Y. Surrel, N. Fournier, M. Grédiac, P.-A. Paris. *Phase-stepped deflectometry applied to shape measurement of bent plates*, Experimental Mechanics, 39(1) :66-70, 1999.
- [6] P.L. Reu et al. *A study of the influence of calibration uncertainty on the global uncertainty for digital image correlation using a Monte Carlo approach*, Experimental Mechanics, 52(7) :1-15, 2012.
- [7] R.T. Frankot, R. Chellappa. *A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms*, IEEE Trans. PAMI, 10(4) :439-451, 1988.