



**HAL**  
open science

# **Imagerie vibratoire de plein champ : vers l'utilisation de caméras de vision industrielle ou de téléphones cellulaires pour l'application des méthodes de grille**

Anaïs Mougey, Audrey Guy, Olivier Robin, Manuel Melon

## ► To cite this version:

Anaïs Mougey, Audrey Guy, Olivier Robin, Manuel Melon. Imagerie vibratoire de plein champ : vers l'utilisation de caméras de vision industrielle ou de téléphones cellulaires pour l'application des méthodes de grille. CFA 2025 - 17e Congrès Français d'Acoustique, Société Française d'Acoustique (SFA), Apr 2025, Paris, France. <hal-05364733>

**HAL Id: hal-05364733**

**<https://inria.hal.science/hal-05364733v1>**

Submitted on 14 Nov 2025

**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.



HAL Authorization

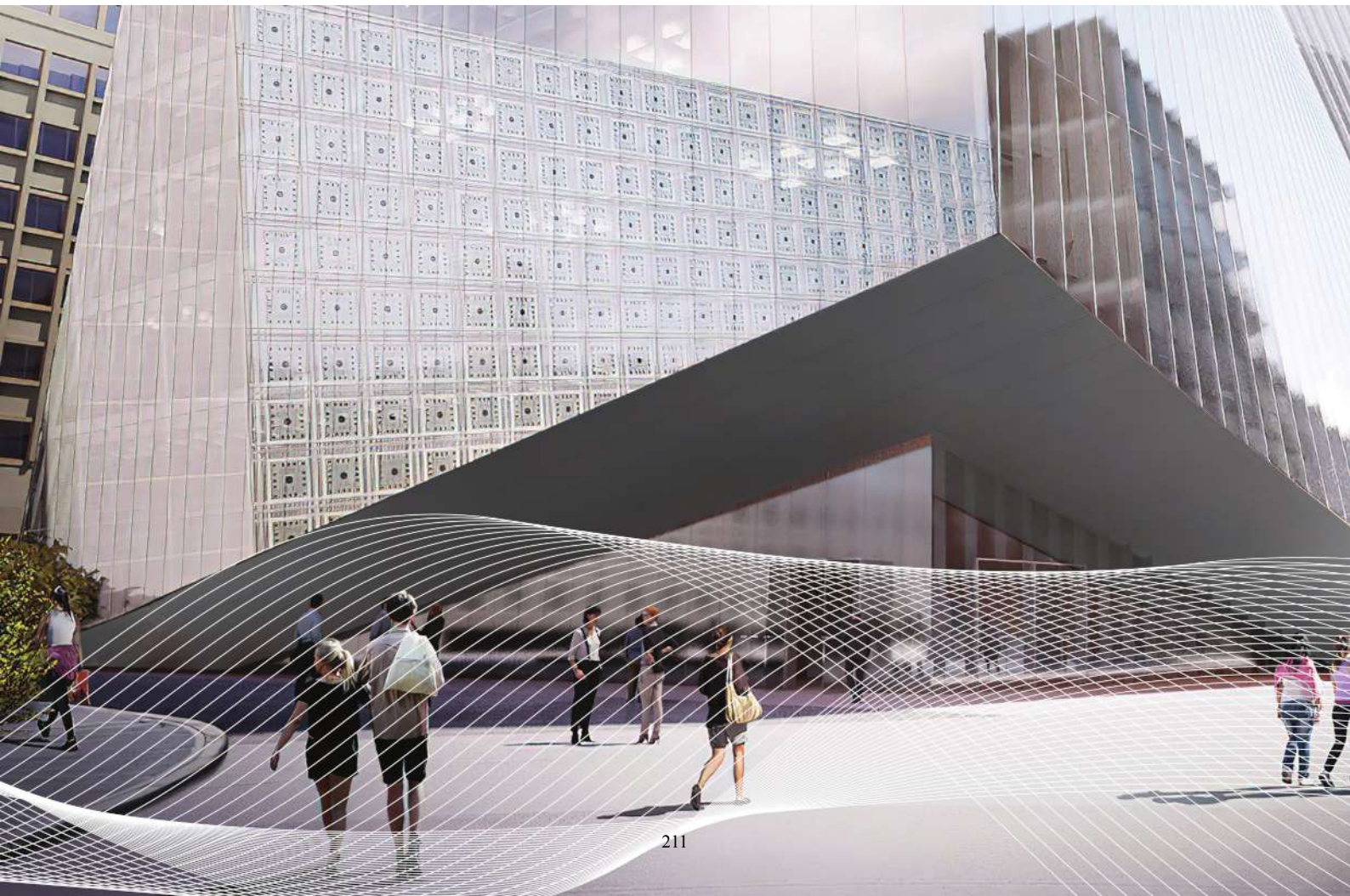
17<sup>e</sup> Congrès Français d'Acoustique  
27-30 avril 2025, Paris

Imagerie vibratoire de plein champ : vers l'utilisation de caméras de vision industrielle ou de téléphones cellulaires pour l'application des méthodes de grille

A. Mougey <sup>a,b</sup>, A. Guy <sup>b</sup>, O. Robin <sup>b</sup> et M. Melon <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM), UMR 6613, Institut d'Acoustique - Graduate School (IA-GS),  
CNRS, Le Mans Université

<sup>b</sup> CRASH-UdeS, Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke, 2500 Bd de l'Université, Sherbrooke, QC J1K2R1, Canada



Ce travail s'intéresse à l'imagerie vibratoire de plein champ par méthodes de grilles avec des caméras industrielles et caméras de smartphones. Le développement de caméras numériques fonctionnant à grande vitesse dans les années 90 a marqué le début d'une nouvelle ère pour les techniques de mesure vibratoire de plein champ. Ces techniques sont sans contact et elles exploitent un ou plusieurs capteurs optiques pour fournir des cartographies détaillées de grandeurs physiques telles que les déplacements, les déformations, les pentes, les courbures ou les coordonnées des points d'une surface. En vibro-acoustique les phénomènes d'intérêt se concentrent souvent dans une plage de fréquences relativement basse. L'utilisation de caméras haute vitesse, qui impliquent un investissement financier et technique conséquent, peut alors dépasser les besoins réels, ce qui invite à repenser nos pratiques pour privilégier des outils plus simples et suffisants. L'objectif de cette recherche est donc de présenter la mise en place de dispositifs expérimentaux pour l'application de méthodes de grille avec des capteurs optiques de moyenne et faible vitesse dont des smartphones. Grâce aux évolutions rapide des technologies, leurs capteurs haute résolution et performances vidéo améliorées peuvent représenter une solution accessible pour l'imagerie vibratoire de plein champ à plus basse fréquence. Les défis techniques, les opportunités, les astuces méthodologiques, et les limitations pratiques liées à l'utilisation de ces capteurs sont explorés à travers différents essais expérimentaux, notamment de la déflectométrie et de l'imagerie plein champ des déformations d'échantillons soumis à des efforts de traction.

## 1 Introduction

Cette étude explore la faisabilité de l'utilisation des caméras intégrées aux smartphones, des appareils omniprésents du quotidien, comme alternative aux systèmes optiques conventionnels pour mesurer de plein champ des déformations par la méthode de grille d'un échantillon soumis à une contrainte de traction.

La méthode de grille est une technique utilisée pour mesurer des déplacements dans le plan et les composantes de la déformation sur des échantillons soumis à de faibles déformations. Ces échantillons sont marqués d'un motif régulier. L'idée repose sur le fait qu'un marquage régulier facilite le suivi des déplacements des points de la surface d'étude lors de la déformation. Cette approche a été documentée dès les années 1940 [1], où les mesures étaient réalisées manuellement en comparant les coordonnées des motifs avant et après déformation. L'avènement des caméras numériques et des outils informatiques a permis d'automatiser cette analyse, facilitant son application. Les techniques de grille sont actuellement limitées aux surfaces planes, mais elles se distinguent par leur faible coût ainsi que par une sensibilité et une résolution ajustables indépendamment de la résolution spatiale du capteur. Toutefois, le choix du capteur optique reste une contrainte majeure. Avec la diversité des caméras disponibles sur le marché, sa sélection repose sur un compromis entre les exigences spécifiques de l'application et les considérations budgétaires. Bien que les méthodes de grille soient traditionnellement mises en œuvre avec des caméras haut de gamme, les smartphones intègrent aujourd'hui des capteurs optiques performants et accessibles, pouvant s'avérer suffisants pour une large gamme d'applications.

Plusieurs travaux ont déjà exploré l'utilisation de smartphones pour l'imagerie vibratoire, notamment en suivi de santé des structures (Structural health monitoring) dans le domaine du génie civil [2] ou le suivi sismique [3]. Une comparaison de mesures effectuées avec un vibromètre laser, une caméra haute vitesse (FASTCAM SAX-2) et des caméras grand public (GoPro Hero 5 Black et Iphone

6) est réalisée par Durand-Texte [4] pour la mesure de déplacements axiaux d'une membrane de haut-parleur avec une méthode de vision 3D. Yu présente dans [5] un système de corrélation d'images stéréo-numériques (DIC) économique et portable, qui utilise un smartphone et un accessoire adapté au cellulaire composé de quatre miroirs servant à diviser la scène en deux sous-images (stéréovision) pour des mesures de déformation, déplacement et forme 3D. Plus récemment, Occhipinti [6] a mis en avant la pertinence de l'utilisation des smartphones à des fins éducatives et/ou pour une première approche de la dynamique des structures en réalisant des expériences simples de DIC.

Un travail exhaustif a été mené par Grédiac et al. [7] sur l'imagerie du champ de déformation en traction par la méthode de grille. Ici, ce travail propose une preuve de concept visant à utiliser des caméras de smartphones et de vision industrielle pour la réalisation de mesures de plein champ à basse fréquence d'un échantillon soumis à des efforts de traction avec la méthode de grille. L'objectif est d'explorer le potentiel des smartphones en tant qu'alternative accessible aux systèmes de capture traditionnels en laboratoire, dans une approche technico-pratique.

## 2 La méthode de grille

La méthode de la grille est une technique optique de mesure de plein champ. Elle repose sur le suivi des déplacements dans le plan d'un échantillon marqué d'un motif régulier, puis soumis à une ou plusieurs contraintes. Un motif de lignes espacées d'un pas constant permet de mesurer les déplacements dans une direction spécifique, tandis qu'un motif en grille permet d'accéder aux informations en deux dimensions.

Considérons un problème bi-dimensionnel : soit un échantillon marqué par une grille constituée d'une succession de lignes orthogonales espacées d'un pas constant  $p$  dans les deux directions de l'espace. Une caméra

est placée devant le spécimen d'étude et enregistre les images du motif régulier monochrome. Les images sont interprétées en termes d'intensité lumineuse et assimilées à un signal sinusoïdal [8]. On note par des indices  $-r$  et  $-d$  les quantités respectivement issues d'un échantillon au repos et déformé.

$$I_r(x, y) = I_0(x, y) \left[ 2 + \gamma \cos(2\pi f x) + \gamma \cos(2\pi f y) \right] \quad (1)$$

$$I_d(x, y) = I_0(x, y) \left[ 2 + \gamma \cos(2\pi f x + \phi_x(x, y)) + \gamma \cos(2\pi f y + \phi_y(x, y)) \right] \quad (2)$$

où  $I_0$  est l'illumination globale moyenne du champ;  $\gamma$  est le contraste moyen du motif compris entre 0 et 1;  $f$  est la fréquence de la porteuse, définie comme l'inverse du pas  $p$  du motif de grille. Enfin  $\phi_x(x, y)$  et  $\phi_y(x, y)$  sont les modulations de la phase au point  $(x, y)$  considéré définies modulo  $2\pi$  long des axes  $x$  et  $y$ .

D'après l'équation (2), lorsque l'échantillon subit une déformation dans le plan, la distribution d'intensité est déphasée de  $\Delta\Phi(x, y) = \Phi_d(x, y) - \Phi_r(x, y)$ , avec  $\Phi_d$  et  $\Phi_r$  les phases de l'image déformée et de référence. Le champ de déformation est identifié à partir du champ de phase calculé entre deux images : une image de référence, prise lorsque le système est au repos, et des images prises successivement lorsque le système est soumis à des déformations. Dans ses travaux [7], Grédiac présente deux approches possibles pour le calcul de la déformation : une approche rigoureuse et itérative ou une approche approximative, mais en une seule étape. Dans l'approche approximative, le déphasage est calculé entre un même point d'une image déformée et l'image de référence, sans prendre en compte le déplacement physique de ce point. Dans ce cas, le champ de déformation selon une direction est estimé par l'équation (3).

$$\begin{cases} \epsilon_{xx} = -\frac{p}{2\pi} \frac{\partial \Delta\phi}{\partial x}, \\ \epsilon_{yy} = -\frac{p}{2\pi} \frac{\partial \Delta\phi}{\partial y}. \end{cases} \quad (3)$$

Cette hypothèse s'avère pertinente dans les cas où le déplacement reste faible [7], ce qui correspond aux conditions étudiées dans ce travail. Étant donné que l'objectif est d'explorer l'imagerie de faibles déformations, cette simplification a été adoptée pour les expériences présentées.

L'algorithme utilisé pour extraire les variations de phase est la Transformée de Fourier Discrète Fenêtrée (Windowed Discrete Fourier Transform). C'est l'algorithme le plus largement utilisé avec les méthodes de grilles [9]. Il nécessite un réglage spécifique lors de l'acquisition des images par la caméra : une période de grille doit idéalement correspondre à un nombre entier de pixels du capteur. Pour garantir au mieux cette condition cruciale, le positionnement grille/caméra doit être ajusté de sorte à ce que les lignes du motif soient alignées aux pixels du capteur de la caméra.

### 3 Marquage des grille pour la mesure des déformations dans le plan

Un état de l'art des techniques employées pour marquer des échantillons avec des grilles est présenté dans [7]. Les techniques adoptées pour les échelles les plus fines aux plus grandes sont renseignées. La qualité de la grille affecte logiquement la précision de la grille. En mécanique expérimentale de moyenne échelle, beaucoup de travaux ont privilégié le marquage par lithographie pour sa précision de l'ordre de la centaine de micromètres. Le pas de la grille utilisée pour les essais présentés ici est de l'ordre du mm. Une technique simple de réalisation qui a d'abord été envisagée fut l'utilisation d'un pochoir et de peinture. Dans ce cas, le pochoir est obtenu par découpe laser d'un motif de grille (ou de lignes régulièrement espacées dans une direction de l'espace) dans un papier adhésif. Finalement c'est une impression par sérigraphie qui a été choisie car plus précise. Cette technique économique est aussi un procédé d'impression par pochoir avec une résolution d'impression  $\approx 150$  lpi (lignes au pouce) qui garantit une couleur intense et une bonne opacité. Le marquage a été effectué sur des échantillons ayant une base naturelle claire ou peinte en blanc pour assurer un contraste fort. Un point de vigilance doit être apporté sur le fini de la surface qui, selon sa nature, peut affecter l'adhérence de l'impression.

### 4 Avantages de l'utilisation d'un smartphone pour des mesures de plein champ

L'utilisation d'un smartphone pour des mesures de plein champ présente plusieurs avantages dont notamment son accessibilité en termes de coûts et le grand nombre de modèles disponibles. Son déploiement est relativement simple, la contrainte principale restant un alignement précis du capteur avec les lignes de grille. Les lignes de cadrage de l'interface photo/vidéo et le gyroscope intégré à l'appareil peuvent faciliter cette étape. De plus, la résolution des capteurs est généralement suffisante pour traiter des images de grilles avec un pas de l'ordre du mm. Un autre atout important réside dans la capacité de stockage instantané, généralement supérieure à celle des caméras plus couramment utilisées en imagerie, permettant ainsi l'enregistrement de séquences longues sans interruption.

Cependant, l'utilisation des smartphones pour des mesures dynamiques soulève plusieurs défis. Les capteurs vidéo des téléphones ne sont pas initialement conçus pour des acquisitions haute fréquence, ce qui limite leur utilisation pour l'analyse de mouvements rapides. L'encodage automatique des vidéos, souvent appliqué par les algorithmes internes des smartphones, peut altérer les données et nécessite un traitement supplémentaire pour retrouver une information fiable. Toutefois, avec l'évolution rapide du marché des smartphones, certains modèles commencent à proposer des modes d'acquisition permettant

de récupérer des images brutes (format *raw*), ce qui ouvre la porte à une meilleure maîtrise du traitement des données et à une réduction des artefacts liés à la compression. Enfin, la stabilisation automatique intégrée aux modes vidéo peut poser des difficultés, car elle modifie les images enregistrées et est difficile à désactiver selon les modèles de téléphone. Bien que les smartphones ne soient pas encore adaptés à l'imagerie vibratoire rapide, ils pourraient être une alternative intéressante pour des mesures quasi-statiques et/ou à faible fréquence.

## 5 Application et résultats

### 5.1 Installation expérimentale

Dans cette étude, des essais de traction ont été menés afin d'évaluer la faisabilité de l'imagerie de déformation par la méthode des grilles à l'aide d'un smartphone. Les résultats obtenus avec cette approche ont été comparés à ceux issus d'une méthode de référence classique basée sur l'utilisation de jauges de déformation, ainsi qu'à une acquisition des images avec une caméra industrielle.

Les essais ont été réalisés au sein du laboratoire des structures de l'Université de Sherbrooke avec une presse MTS 100 kN, permettant d'appliquer des efforts de traction contrôlés sur les échantillons testés. Ces derniers sont constitués de morceaux de Dibond, un matériau composite. Des jauges de déformation Student Gages (CEA-06-240UZ-120 ohms) ont été collées sur la surface non marquée des spécimens et servent de référence locale. Pour l'acquisition des images, deux types de capteurs optiques ont été utilisés pour l'acquisition des images d'une zone de  $7 \times 5$  cm de l'échantillon. Un aperçu des images utilisées pour l'application de la méthode de grille est donné en figure 1.

Le premier capteur est une caméra industrielle Ximea MQ013MG-ON avec une taille de capteur de 1/2", une résolution de  $256 \times 256$  pixels. Le second, un smartphone iPhone 8 Plus ayant un capteur de 1/3" et une résolution de  $3840 \times 2160$  pixels (4K). Les deux appareils enregistrent avec fréquence d'acquisition de 30 images par seconde. Cette fréquence est adaptée à l'évolution des efforts de traction qui étaient contrôlés manuellement au cours de l'expérience. Le tableau 5.1 donne un aperçu des différences de performances plein format et de prix des deux alternatives utilisées pour ces essais par rapport à une caméra haute vitesse (Photron Mini AX200).

Caméra	Fréquence d'acquisition	Résolution	Prix (\$ US)
Caméra haute vitesse	6 400 images/s	1024×1024 px	55 000
Caméra industrielle	1000 images/s	256×256 px	1 100
Smartphone	240 images/s	3840×2160 px	500

TABLEAU 1 – Tableau 1 - Comparatif succinct de trois types de capteurs optique (pour résolution maximale).

L'installation expérimentale est relativement rapide et simple à réaliser, un aperçu est montré à la figure 2.

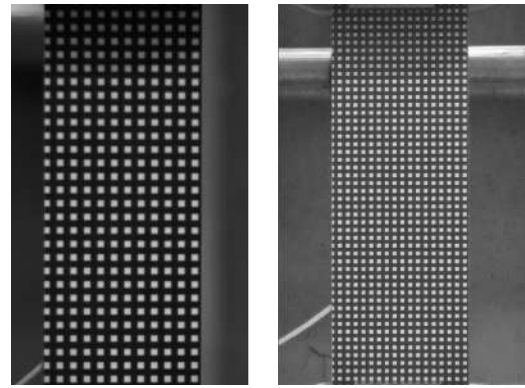


FIGURE 1 – Photos capturées par la caméra vision (à gauche), et par le smartphone (à droite).

L'installation et l'acquisition des données peuvent être divisées en 5 étapes :

1. L'échantillon à tester est centré dans la machine de traction dans un lieu avec une luminosité stable si possible afin de garantir une bonne interprétation des images de grille en terme d'intensité lumineuse.
2. La ou les caméras sont placées face au motif de grille. Les pixels du capteur de la caméra doivent être le plus alignés possible avec les lignes de la grille pour obtenir un nombre entier de pixel par période (il est pertinent d'utiliser le gyroscope interne du smartphone et les lignes de cadrage de l'interface vidéo).
3. Le système de 'tracking' et de stabilisation automatique du capteur vidéo doivent être désactivés.
4. Le cadrage est choisi pour obtenir une bonne visibilité de la zone d'étude et un bon contraste du motif de grille sur les images.
5. L'enregistrement vidéo est lancé quelques seconde avant le début de l'essai de traction pour extraire de cette courte séquence l'image de référence de l'échantillon au repos.

L'extraction des images des vidéos est réalisée a posteriori des essais. Elles sont au besoin recadrées puis utilisées pour la méthode de grille selon le processus expliqué à la section 2.

### 5.2 Résultats

La figure 3 présente l'évolution de la déformation mesurée en un point (centre de l'échantillon) à l'aide d'une jauge de déformation, par l'application de la méthode de grille à des images obtenues avec une caméra industrielle et avec un téléphone cellulaire. La courbe issue de la mesure avec téléphone cellulaire présente un décalage initial d'amplitude par rapport aux autres mesures. L'origine de ce décalage pourrait résulter d'une erreur d'initialisation lors du traitement d'image ou d'une mauvaise calibration du capteur, notamment avec la luminosité ambiante. Ces anomalies sont sûrement aussi à l'origine des artefacts à 40 s, 65 s et 77 s (voir figure 3). Une contrainte principale des



FIGURE 2 – De gauche à droite : échantillon centré dans la machine de traction ; caméras placés face à l'échantillon ; capteur du smartphone aligné sur le motif de grille de l'échantillon.

caméras vision est leur mémoire limitée, en particulier pour des enregistrements de longue durée où un débit de données constant est nécessaire. Lorsque la mémoire instantanée est saturée, la fréquence d'acquisition diminue subitement, ce qui crée un décalage temporel dans les résultats. Au maximum de déformation, les amplitudes mesurées par les caméras coïncident bien, tandis que les valeurs obtenues avec la jauge de déformation sont légèrement inférieures. Cette différence peut être expliquée par le fait que les caméras et la jauge ne mesurent pas exactement la même zone du matériau. La jauge fournit une valeur moyennée sur sa surface de collage, alors que les caméras analysent localement les déplacements à partir des motifs de grille. De plus, le processus de collage de la jauge pourrait influencer la mesure.

avec un smartphone. Bien que les jauges de déformation soient couramment utilisées, elles ne fournissent qu'une information locale. L'adoption d'une méthode de mesure optique permet, quant à elle, d'imager la déformation sur une surface étendue (voir figure 4), offrant ainsi une vision plus complète du comportement du matériau, ce qui s'avère particulièrement pertinent en cas de défauts locaux ou d'un matériau anisotrope ou composite. Contrairement aux jauges, qui transmettent les données en temps réel via leur connexion directe à la machine de traction, les résultats issus de l'imagerie nécessitent un traitement différé. Toutefois, le développement d'une application dédiée sur smartphone pourrait permettre une analyse et une restitution quasi instantanées des résultats.

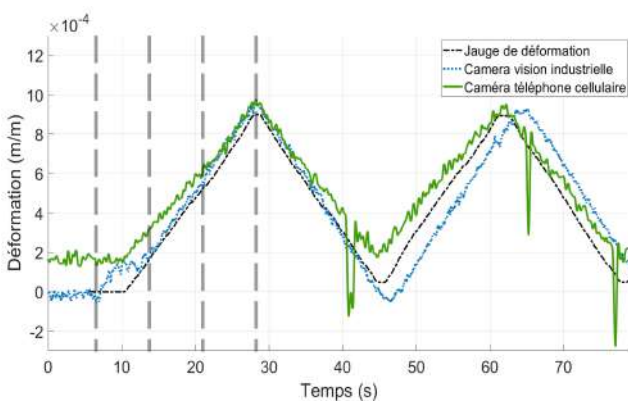


FIGURE 3 – Déformation en un même point d'un échantillon soumis à un effort de traction obtenu par une jauge de déformation, la méthode de grille appliquée à des images issues d'une caméra vision industrielle et une caméra de téléphone cellulaire. Les lignes verticales en tirets correspondent aux instants représentés à la figure 4.

Malgré ces limitations, les résultats montrent une cohérence globale entre les trois méthodes et sont encourageants pour la poursuite des travaux, en particulier

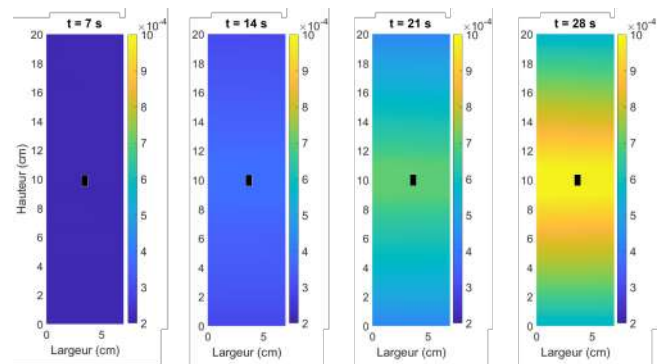


FIGURE 4 – Champs de déformation à quatre instants d'un essai de traction obtenu avec un téléphone cellulaire. Le rectangle noir central représente l'emplacement de la jauge collé au dos de la structure.

## 6 Conclusion

Les travaux présentés ici mettent en évidence le potentiel des smartphones pour l'imagerie vibratoire de plein champ à basse fréquence pour l'utilisation de la méthode de grille. Cette technique optique de mesure de déplacements et

déformations dans le plan est appliquée à un échantillon soumis à des efforts de traction. Une jauge de déformation est utilisée comme référence locale, tandis que la méthode de grille fournit une cartographie simultanée des déformations sur un maillage de points à la surface de l'échantillon. Une caméra de vision industrielle est également utilisée pour comparer les performances de la méthode de grille à partir d'une série d'images issues d'un autre type de capteur. Les premiers résultats montrent que les déformations extraites des images de la caméra industrielle suivent plus fidèlement celles mesurées par la jauge, en raison d'une qualité d'image supérieure. Toutefois, les résultats obtenus avec le smartphone sont prometteurs et ouvrent des perspectives intéressantes. Son accessibilité et sa simplicité de mise en place en font une alternative attractive aux systèmes traditionnels de mesure optique.

Les perspectives de recherche s'orientent vers une exploration plus approfondie des capteurs embarqués dans les smartphones afin de mieux comprendre leur fonctionnement, notamment en ce qui concerne le traitement des images et l'optimisation des choix de paramètres d'acquisition. Le développement d'une application dédiée, permettant d'optimiser la capture des données et d'offrir un contrôle plus précis sur les paramètres d'enregistrement est également une piste d'évolution. Enfin, l'utilisation de l'algorithme de vélocimétrie par images de particules (PIV) [10] constitue une alternative intéressante à l'algorithme WDFT. Contrairement à la WDFT, utiliser un algorithme PIV soulèverait la contrainte du nombre entier de pixels par période de grille nécessaire pour l'extraction correcte des phases.

## Remerciements

Merci à Ahmed Maslouhi, Marc Rousseau, Olivier Gauron et Eric Bélisle de la faculté de génie de l'Université de Sherbrooke pour votre aide dans la mise en place de ces essais.

## Références

- [1] V. J. Parks. The grid method. *Experimental Mechanics*, 9(7) :27N–33N, July 1969.
- [2] B. Xie, X. Chen, M. Ding, G. Zhou, and X. Zhao. Design and development of a new strain measuring method based on smartphone and machine vision. *Measurement*, 182 :109724, 2021.
- [3] X. Chen, H. Li, C. Zhao, G. Zhou, W. Li, X. Zhang, and X. Zhao. Smartphone-based method for measuring maximum peak tensile and compressive strain. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 39(15) :2330–2349, 2024.
- [4] T. Durand-Texte, M. Melon, E. Simonetto, S. Durand, and M.-H. Moulet. 3d vision method applied to measure the displacement of loudspeaker membranes. 2018.
- [5] L. Yu, R. Tao, and G. Lubineau. Accurate 3d shape, displacement and deformation measurement using a smartphone. *Sensors*, 19(3) :719, February 2019.
- [6] S. Occhipinti, P. Neri, C. M. Firrone, and D. Botto. Dic vibration measurement through smartphone devices. In *Journal of Physics : Conference Series*, volume 2802, page 012009. IOP Publishing, 2024.
- [7] M. Grédiac, F. Sur, and B. Blaysat. The grid method for in-plane displacement and strain measurement : A review and analysis. *Strain*, 52(3) :205–243, 2016.
- [8] C. Badulescu, Michel Grédiac, and Jean-Denis Mathias. Investigation of the grid method for accurate in-plane strain measurement. *Measurement Science and Technology*, 20 :095102, 07 2009.
- [9] Y. Surrel. Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping. *Applied Optics*, 35(1) :51, January 1996.
- [10] William Thielicke and Eize J. Stamhuis. Pivlab – towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in matlab. *Journal of Open Research Software*, 2(1), October 2014.