



HAL
open science

Corrélation d'images stéréoscopiques à l'échelle des grains : Application à la déformation par fatigue plastique d'un acier inoxydable 316L

Eddy Caron, Arnaud Beaurain, A. Berger, Ahmed El Bartali, Vincent Magnier, Jean-Francois Witz

► To cite this version:

Eddy Caron, Arnaud Beaurain, A. Berger, Ahmed El Bartali, Vincent Magnier, et al.. Corrélation d'images stéréoscopiques à l'échelle des grains : Application à la déformation par fatigue plastique d'un acier inoxydable 316L. 25ème Congrès Français de Mécanique (CFM), Association Française de Mécanique (AFM), Aug 2022, Nantes, France. hal-04492268

HAL Id: hal-04492268

<https://hal.science/hal-04492268>

Submitted on 6 Mar 2024

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.

Corrélation d'images stéréoscopiques à l'échelle des grains : Application à la déformation par fatigue plastique d'un acier inoxydable 316L

E. CARON^a, A. BEAURAIN^a, A. BERGER^a, A. EL BARTALI^a, V. MAGNIER^a, JF. WITZ^a

a. Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LaMcube - Laboratoire de Mécanique, Multiphysique, Multiéchelle, F-59000 Lille, France

eddy.caron@centralelille.fr

Mots clefs : Stéréoscopie à l'échelle microscopique, plasticité inter et intra-granulaire, développement d'une méthode de calibration

Résumé :

L'objectif de ce papier est de proposer une démarche complète allant de l'identification à la quantification des mécanismes liés à la plasticité par Corrélation d'Images Numérique (CIN) dans le plan et hors plan. Dans cette démarche, l'étude des champs cinématiques 3D nécessite une phase de calibration des caméras. Les méthodes usuelles, telle que celle portant sur le modèle du sténopé, ne sont pas adaptées à ces cas d'étude car elles ne sont suffisamment précises et peuvent être chronophages. Dans ce papier, deux méthodes de calibration sont proposées à l'échelle micrométrique : une première méthode polynomiale dite « directe » et une seconde méthode inverse utilisant l'interpolation polynomiale de Soloff. D'autant plus que pour accélérer la résolution, un algorithme d'Intelligence Artificielle (IA) est implémenté. Pour illustrer la méthode, un exemple sur une éprouvette rugueuse est proposé montrant l'efficacité de la méthode. A ce titre, une comparaison des différentes méthodes ainsi que leurs limites d'application sont exposées.

1 Introduction

Pour comprendre les mécanismes de plasticité et d'endommagement à l'échelle de la microstructure des matériaux polycristallins, des observations in-situ couplées à des mesures de champs cinématiques de plus en plus précises sont nécessaires. Ces mesures cinématiques sont essentiellement déployées pour accéder aux champs de déplacements et de déformations dans le plan pour les matériaux homogènes ou en volume (en utilisant la tomographie à rayon X) pour certains matériaux hétérogènes (multi-constituants, défauts...). Dans le cadre de la fatigue oligocyclique, l'une des difficultés est la présence de déformation hors plan se traduisant par des déplacements de l'ordre de plusieurs dizaines de micromètres [1] dû à la déformation plastique généralisée des grains. Cela a pour conséquence l'émergence d'un relief important en surface du matériau. Une approche consiste alors d'utiliser la stéréoscopie qui reste néanmoins difficile à mettre en place aux petites échelles. En effet, une difficulté se situe dans la phase de calibration des capteurs, indispensable à la reconstruction des positions dans l'espace. Cette phase de calibration vise à compenser les défauts, relatifs aux caméras, pouvant induire des erreurs importantes, notamment sur la mesure des effets hors plans.

Des modèles comme celui du sténopé (pinhole) [2-4] existent et permettent de calibrer certains systèmes optiques mais ont leurs limites [5] et ne sont pas adaptés pour des échelles microscopiques. Dès lors qu'est utilisé un système optique plus complexe, il est indispensable de

trouver une autre méthode. Or, le système optique utilisé pour cette étude est un microscope de type CMO (Common Main Objective)[5]. Le modèle du sténopé est donc inapproprié et une nouvelle approche pour la calibration des caméras est nécessaire. Il est possible également de passer par des solutions industrielles¹ mais celles-ci sont coûteuses et ne permettent pas d'accéder aux informations du traitement des données. Cela a pour conséquence de brider la liberté de l'utilisateur et empêche toute combinaison avec d'autres outils de traitements des données.

C'est ainsi que la méthode de calibration utilisant les polynômes de Soloff [6] est développée dans le cadre de ce travail pour accéder à des mesures hors plan aux échelles les plus fines. Puis, à l'aide de la Corrélation d'Images Numérique (CIN), outil largement développé et utilisé dans le domaine de la micromécanique [7-8], les champs cinématiques seront reconstruits. Cette méthode sera comparée à une autre méthode dite directe [9].

2 Méthodologie

La méthodologie proposée sera à terme appliquée à un essai de fatigue oligocyclique sur éprouvette d'acier 316L polie miroir et mouchetée. Il sera néanmoins présenté dans un premier temps deux essais préliminaires sur une pièce de monnaie et sur une éprouvette déformée en traction pour expliquer les différentes phases de calibration et de reconstruction qui restent un challenge notamment aux petites échelles. Cet essai préliminaire a pour but de rendre compte de la capacité de l'algorithme à calibrer les caméras en reconstruisant une image dans l'espace réel 3D. Cette reconstruction se décline en trois étapes :

- Une première étape de calibration de l'espace de travail à l'aide de deux méthodes : la méthode directe et la méthode de Soloff. Cet espace de travail est calibré en en déplaçant une mire de calibration suivant l'axe des caméras, ce qui permet de définir le lien entre les coordonnées réelles de l'espace 3D et les coordonnées projetées sur les deux caméras utilisées.
- Une deuxième étape où l'échantillon est installé dans la zone calibrée puis observé à l'aide d'un stéréomicroscope (fig. 1a,b,d,e).
- Enfin, une dernière étape où les images capturées durant l'essai sont triées. Puis, à l'aide d'une corrélation entre la caméra gauche et la caméra droite (transformations T_0 et T_1 sur la fig. 1), ainsi qu'avec les constantes de calibration préalablement déterminées lors de la première étape, ces images sont reconstruites dans l'espace 3D (fig. 1c,f).

2.1 Méthodes directe et de Soloff

La phase de calibration des caméras est indispensable pour pouvoir prendre en compte les défauts du système optique. Ces défauts sont principalement : les distorsions optiques à travers les lentilles et le non alignement entre l'axe optique et l'axe de la lentille. Ils engendrent ainsi une non linéarité entre les référentiels des deux caméras qu'il faut alors pouvoir compenser.

Deux méthodes de calibration sont ici comparées : la méthode dite directe [9] et la méthode de Soloff [6] faisant toutes les deux intervenir une résolution par ajustement polynomial. Soient les points de coordonnées, $\mathbf{x}(x, y, z)$ dans le référentiel géocentrique (fig. 1c,f). Ces mêmes points auront pour coordonnées $\mathbf{X}_l(X_l, Y_l)$ (fig. 1a,d) dans le référentiel de la caméra gauche et $\mathbf{X}_r(X_r, Y_r)$ (fig. 1b,e) dans le référentiel de la caméra droite. Les deux algorithmes de calibration reposent sur la même problématique à savoir : comment relier mathématiquement les coordonnées \mathbf{x} aux coordonnées \mathbf{X}_l et \mathbf{X}_r ?

1 <http://www.isi-sys.com/category/products/dic-systems/vic-3d-micro-dic/>

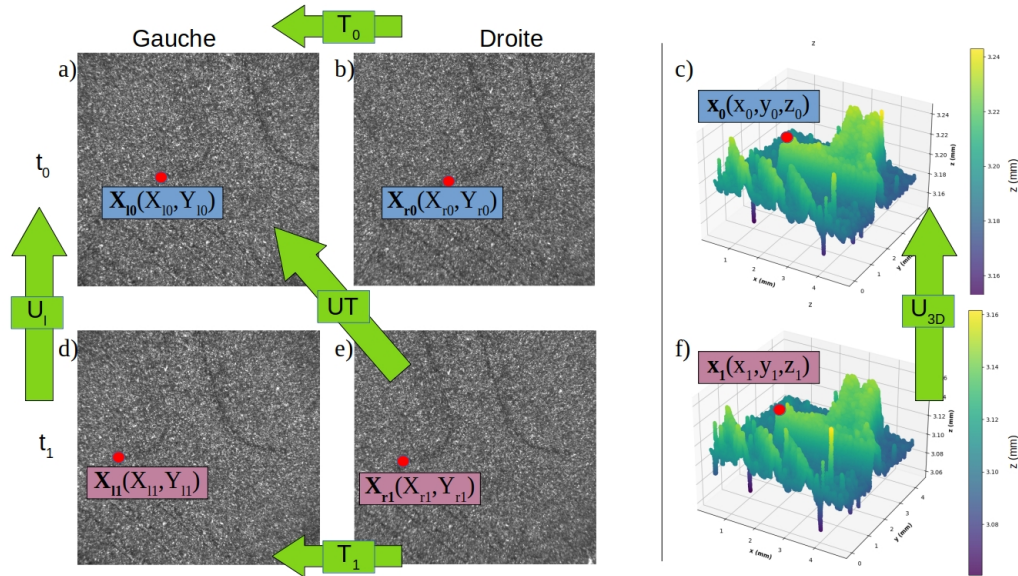


Figure 1 : a) Image gauche à t_0 . b) Image droite à t_0 . c) Image 3D à t_0 . d) Image gauche à t_1 . e) Image droite à t_1 . f) Image 3D à t_1 . U_1 représente les champs de déplacements de la caméra gauche entre les instants t_1 et t_2 . T_0 et T_1 représente les champs de transformation entre les deux caméras. UT représente la composition du champs de déplacement entre t_0 et t_1 et du champs de transformation entre les deux caméras.

La méthode directe relie chaque coordonnée x , y et z à (X_l, X_r) à l'aide des fonctions polynomiales D_i telles que :

$$x = D_i(X_l, X_r, (\alpha, \beta, \gamma)) \text{ (Resp. } y \text{ et } z) \quad (1)$$

La méthode de Soloff relie chaque coordonnée X_l , Y_l , X_r et Y_r à \mathbf{x} à l'aide des fonctions polynomiales S_i telles que :

$$X_l = S_i(\mathbf{x}, a) \text{ (Resp. } Y_l, X_r \text{ et } Y_r) \quad (2)$$

Les constantes de calibration associées à l'équation (1) sont explicitées dans [9] et sont notées α , β et γ . Celles associées à l'équation (2) sont explicitées et détaillées dans [6] et sont notées a . Ces constantes sont dans les deux cas identifiées mathématiquement par inversion matricielle à l'aide de l'ensemble des points connus de tous les référentiels (\mathbf{x}, X_l, X_r) .

2.2 Phase de préparation

Les méthodes de calibration proposées nécessitent avant tout l'utilisation d'une mire qui permettra de cartographier exactement l'espace de travail. Le profil de la mire choisi est le profil ChAruco² (fig. 2a), identifiable par un ensemble de motifs (fig. 2b) générés grâce à la bibliothèque OpenCV¹ du langage Python. Ce profil a été imprimé au laboratoire IEMN par lithographie électronique [10] pour garantir une grande précision ($\sim 20\text{nm}$) du motif. Cela permet de s'assurer du caractère hautement résolu notamment pour l'utilisation aux échelles microscopiques qui nous concernent.

2 https://docs.opencv.org/3.4/df/d4a/tutorial_charuco_detection.html

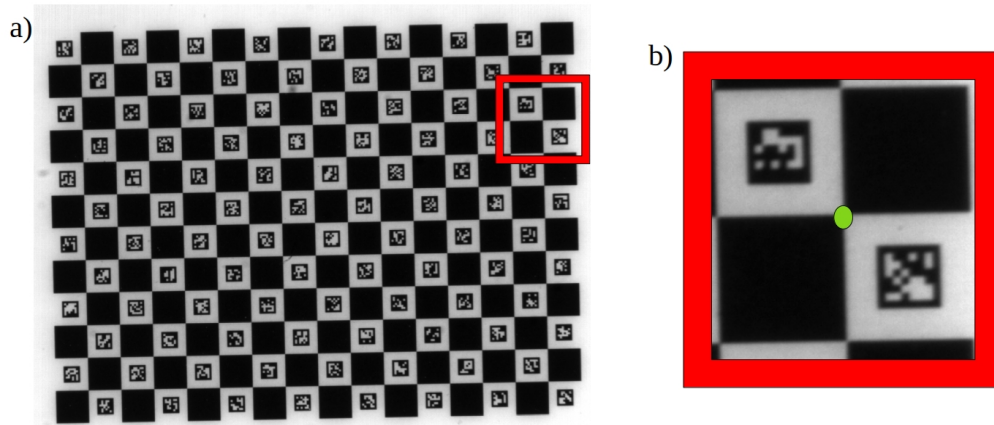


Figure 2 : a) Mire ChAruco. b) Zoom montrant le point identifié (vert) entre deux marqueurs ChAruco

Les images, lors de la phase calibration et durant l'essai, sont prises par deux caméras Ximéa XiQ³ (résolution 2048*2048 pixels), installées sur un stéréomicroscope Leica 205M⁴ (fig. 3). La mire est installée sur une platine micrométrique 3 axes, motorisée suivant la direction z. Le déplacement est obtenu précisément grâce à un microcontrôleur SMC100PP⁵ (résolution 0.1µm). La mire nécessitant un rétroéclairage pour être identifiable, l'éclairage est assuré par un anneau de lumière qui se situe derrière celle-ci. L'échantillon observé durant cette étude est une pièce européenne de 1 centimètre sur laquelle est déposé un mouchetis. Celui-ci consiste en un dépôt d'une première couche de peinture uniforme noire puis de particules de craie sous forme de solution (craie + éthanol) à l'aide d'un aérographe. Ce mouchetis permet d'avoir un bon contraste pour l'utilisation de la technique de CIN [11]

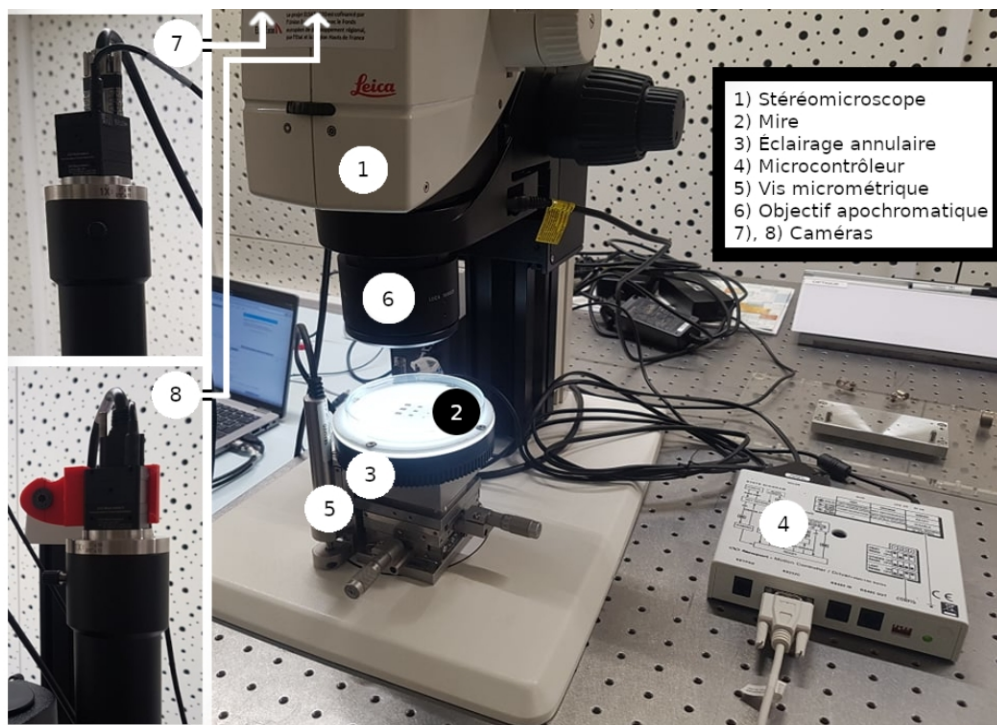


Figure 3 : Dispositif expérimental

3 <https://www.ximea.com/usb3-vision-camera>

4 <https://www.leica-microsystems.com/products/stereo-microscopes-microscopes/p/leica-m205-fca/>

5 <https://www.newport.com/>

2.3 Phase de calibration

La figure 3 présente le dispositif expérimental composé du système optique (stéréomicroscope, objectif et caméras), du système de pilotage (vis micrométrique et microcontrôleur), de la mire de calibration et de l'éclairage annulaire. La mire est disposée sur la platine micrométrique et deux images sont capturées à l'aide des deux caméras (fig. 4a pour l'image gauche et 4b pour l'image droite). Puis, à l'aide de la vis micrométrique, la mire est déplacée d'un pas $dz=5\mu\text{m}$ (fig. 4c). Deux nouvelles images sont alors capturées et le processus est réitéré sur 101 plans différents ($\Delta z = 500\mu\text{m}$). Les dimensions de la mire et les déplacements suivant l'axe z sont précisément connus ce qui implique que chaque position \mathbf{x} de chaque point identifiable de la mire peut être construit dans l'espace 3D. De plus, ces points étant identifiables par OpenCV, leurs positions \mathbf{X}_l et \mathbf{X}_r peuvent être détectées dans chacune des deux caméras. Les figures 4a et 4b présentent les points détectés sur la mire de calibration et la figure 4c montre ces mêmes points construits dans l'espace 3D (points en rouge). Ce processus est réitéré dans cet exemple sur 4 autres plans (points en bleu). L'étendue de ces plans ($\Delta z=4dz$ sur la figure 4c) doit contenir toute la profondeur de champs des caméras pour s'assurer que l'ensemble de l'espace observable soit calibré. Ces images sont ensuite rangées et leur position z est enregistrée pour la phase de post-traitement.

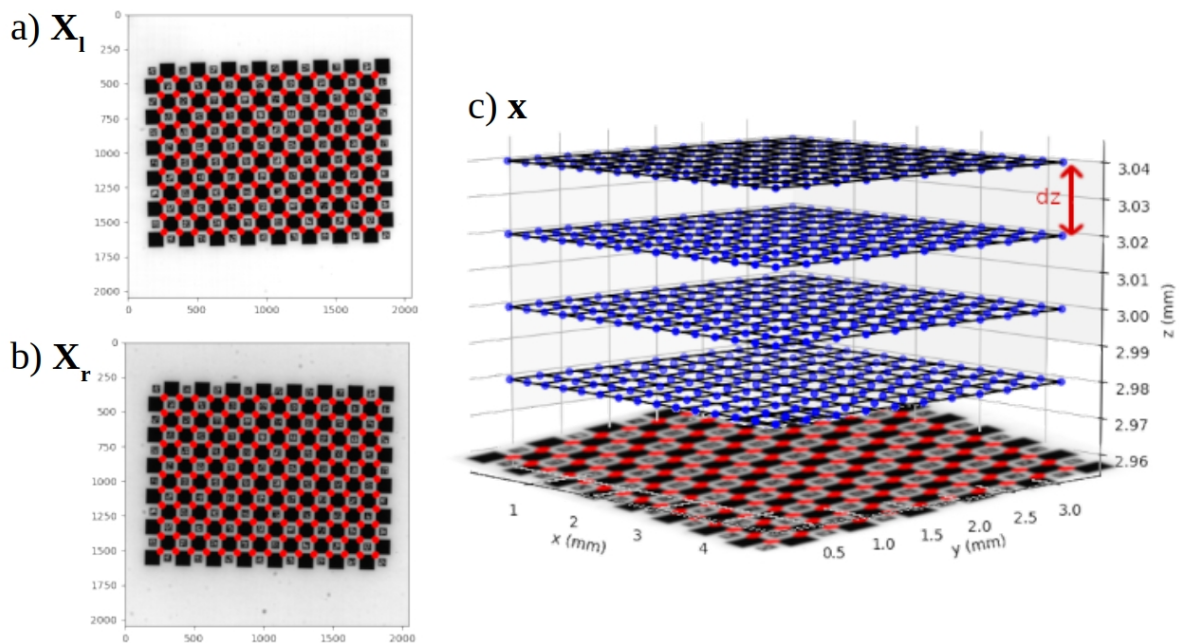


Figure 4 : a) Détection gauche des marqueurs ChAruco. b) Détection droite des marqueurs ChAruco. c) Position dans l'espace 3D des marqueurs ChAruco.

2.4 Acquisition de données et phase de post-traitement

Pour illustrer, une pièce de monnaie mouchetée est installée devant le système optique, une nouvelle paire d'images est prise et enregistrée. Le calcul des champs de transformations T_1 (fig. 2) (U suivant l'axe x et V suivant l'axe y) entre les caméras droite et gauche [7] est déterminé par CIN à l'aide de la bibliothèque OpenCV⁶. Ce calcul permet pour chaque pixel ($i \in [1, 2048]$, $j \in [1, 2048]$) de la caméra gauche, de définir un point situé dans le référentiel gauche $\mathbf{X}_l(i, j)$ et de l'associer à son correspondant situé dans le référentiel droit $\mathbf{X}_r(i+U, j+V)$. La reconstruction du point \mathbf{x} par la méthode de Soloff se divise alors en deux étapes ; une première étape d'estimation de cette position notée \mathbf{x}_0 et une seconde étape où un algorithme de Levenberg-Marquardt est utilisé pour affiner la solution. Le

6 https://docs.opencv.org/3.4/da/d06/classcv_1_1optflow_1_1DISOpticalFlow.html

nombre de points à identifier sur une paire d'images de résolution 2048x2048 avoisinant les 4 millions, une telle résolution nécessite un coût de calcul très important de 10 minutes par paire d'images. Un algorithme d'Intelligence Artificielle (IA) est alors proposé pour accélérer ce temps de calcul. Cet algorithme est entraîné dans un premier temps avec les résultats calculés par la méthode de Soloff puis utilisé dans un second temps pour résoudre la reconstruction 3D de tous les points.

3 Résultats

Pour pouvoir comparer la méthode de Soloff et la méthode directe, la mire de calibration (fig. 2a) est inclinée autour de l'axe x et elle est observée au microscope. La mire étant plane, l'ensemble des points reconstruits dans l'espace 3D devraient être inclus dans un plan. La figure 5 montre la distribution de ces points autour du plan médian calculées par la méthode de Soloff (fig. 5a,c) et par la méthode directe (fig. 5b,d).

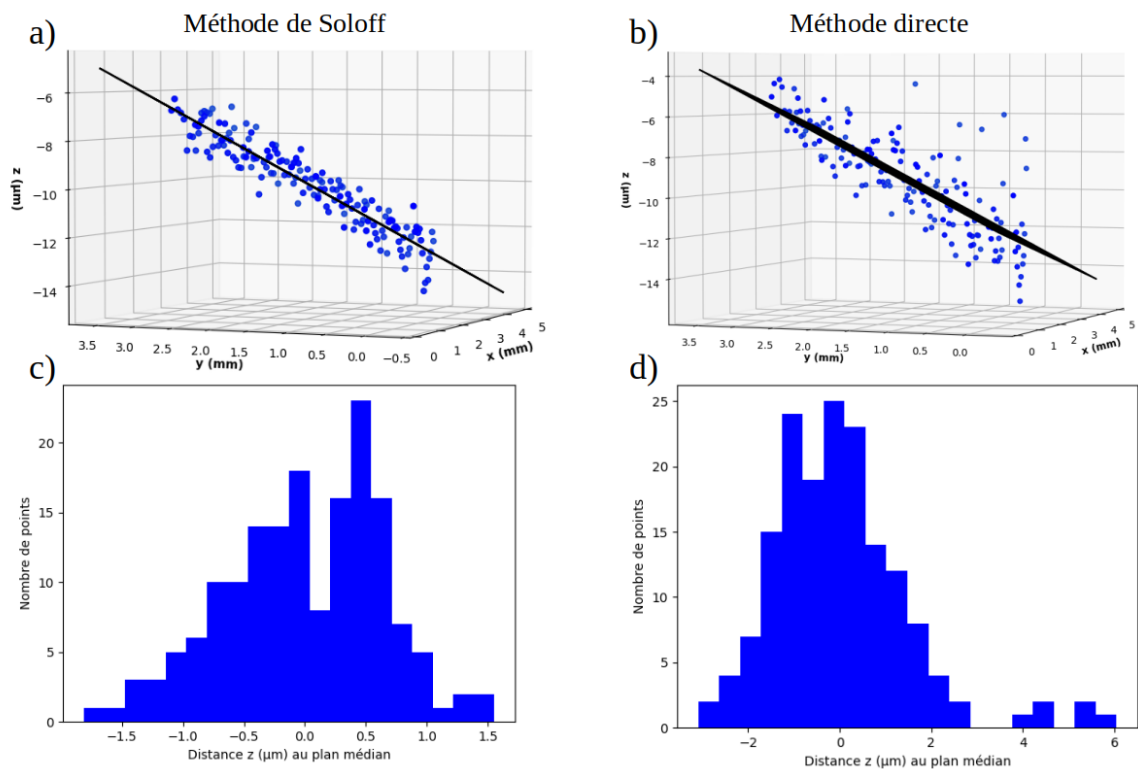


Figure 5 : a) Reconstruction des points détectés dans l'espace par la méthode de Soloff. b) Reconstruction des points détectés dans l'espace par la méthode directe. c) Distribution des distances au plan médian par la méthode de Soloff. d) Distribution des distances au plan médian par la méthode directe.

Les distributions relatives à chaque méthode (fig. 5b,c) montrent que la méthode de Soloff est plus performante avec un écart-type de $0.65\mu\text{m}$ (0.24 px) que la méthode directe avec un écart-type de $1.48\mu\text{m}$ (0.55 px).

La figure 6 présente la reconstruction de la pièce de monnaie mouchetée (fig. 6a) reconstruite en 3D par la méthode de Soloff (fig. 6b) et la méthode IA (fig. 6c). L'écart type mesuré entre ces deux méthodes est de $1.8\mu\text{m}$ (0.6 px). Cet écart est inférieur au pixel ce qui est encourageant pour la suite du développement. Il est à noter que le temps de résolution par IA pour traiter une paire d'images est réduit à moins de 3m30s. Des études complémentaires sont envisagées pour améliorer les performances en termes de précision et de vitesse de calcul.

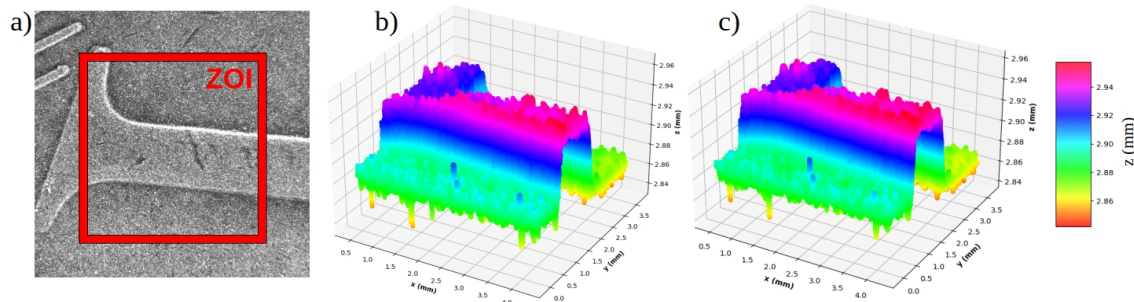


Figure 6 : a) Image de la pièce mouchetée (caméra gauche) et définition de la zone d'intérêt étudiée. b) Reconstruction 3D par la méthode de Soloff. c) Reconstruction 3D par apprentissage d'une IA sur la méthode de Soloff.

A titre d'exemple complémentaire, la méthodologie est appliquée à un cas de déplacement d'une surface plane d'une éprouvette sollicitée en traction. La figure 7a présente la photographie de l'éprouvette non chargée vue par la caméra gauche. Les figures 7b et 7c montrent respectivement les reconstructions des positions dans l'espace 3D par la méthode de Soloff et par un profilomètre interférométrique après une sollicitation de traction.

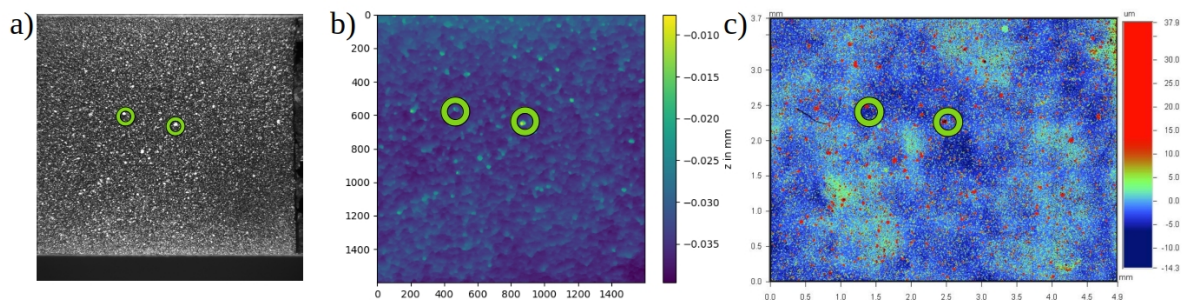


Figure 7 : a) Image gauche de l'éprouvette. b) Projection de z par la méthode de Soloff. c) Mesure du profil de l'éprouvette par profilométrie.

Deux pics d'épaisseur sont localisés en vert sur les figures 7b et 7c et correspondent aux localisations du mouchetis en vert sur la figure 7a. Ces figures montrent que l'épaisseur du mouchetis est non négligeable et avoisine les 30 μ m dans certaines zones. Les distributions de la composante z des figures 7b et 7c sont similaires et permettent de conclure que la reconstruction par la méthode de Soloff décrit bien la réalité à l'échelle microscopique. Une étude plus approfondie de comparaison statistique entre ces deux mesures (fig. 7b et 7c) est cependant en cours pour pouvoir conclure qualitativement sur les performances de la méthode. Enfin, en calculant les champs de déplacements et de transformations U_1 , T_0 et UT (fig. 1) par CIN, il est possible de suivre chaque pixel et de construire les champs de déplacements U_{3D} (fig. 1) de l'espace 3D. Il est notamment possible de calculer la composante du champs de déplacements W suivant l'axe z de U_{3D} . La figure 8c présente cette composante entre l'instant t_0 (fig. 8a) où l'éprouvette n'est pas chargée et l'instant t_1 (fig. 8b) où l'éprouvette est chargée à 500MPa ($\sim 3\%$ de déformation axiale). La figure 8c montre que les déplacements hors plans varient entre -15 et -35 microns avec des déplacements plus importants localisés sur les bords de l'éprouvette.

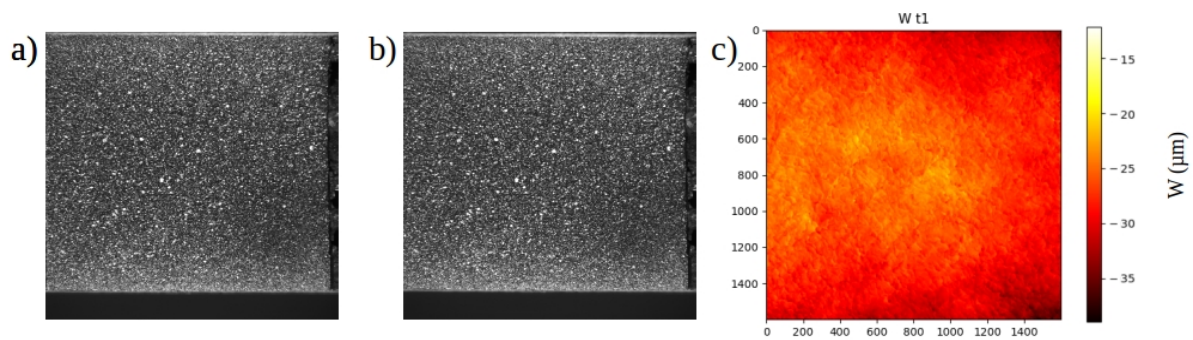


Figure 8 : a) Image de l'éprouvette non chargée à t_0 . b) Image de l'éprouvette chargée à 500 MPa à t_1 . c) Champs de déplacements W suivant l'axe z entre t_0 et t_1 .

Conclusions et perspectives

Il semble important de rappeler qu'il n'existe pas à ce jour de méthode ouverte permettant de faire de telles mesures, ainsi nous espérons ouvrir la voix d'une stéréo-microscopie quantitative grâce aux outils développés dans ces travaux. En effet, la méthode de calibration par les polynômes de Soloff proposée dans cet article a montrée des résultats encourageants en termes de reconstruction de points dans l'espace 3D et d'identification des champs de déplacements.

Son avantage principal est qu'elle ne se base pas sur des modèles définis à priori (modèles qui dépendent du système optique utilisé comme le modèle du sténopé). Ainsi, elle peut s'utiliser sur n'importe quel système optique stéréoscopique, peu importe la complexité de celui-ci. La limite principale identifiée est la dépendance à la précision du montage. Il est donc nécessaire de maîtriser le dispositif de calibration mais également de suivre un protocole strict. Cependant, le matériel reste bien moins coûteux que les solutions industrielles proposées et le protocole est facile et rapide à prendre en main. De plus, la méthode de résolution développée est Open Source et les algorithmes peuvent être consultés sur la plateforme Github⁷.

L'objectif étant l'identification des champs cinématiques dans le plan et hors plan à l'échelle de la microstructure, des essais de fatigue oligocycliques sur un acier inox 316L seront mis en œuvre et permettront de comprendre les mécanismes de plasticité et d'endommagement.

Remerciements

Les auteurs tiennent tout particulièrement à remercier monsieur Christophe CUVIER, maître de conférences au LMFL dans le cadre de la MéOL (plateforme nationale de métrologie optique de Lille), pour ses conseils en début de développement du projet.

Ce travail est également supporté par les projets ELSAT2020 et RITMEA. ELSAT2020 et RITMEA sont co-financés par l'Union Européenne avec le fond européen de développement régional par l'état français et la région des Hauts de France.

⁷<https://github.com/Eddidoune/Pycaso>

Références

- [1] R. Seghir, Experimental and numerical investigation of thermomechanical couplings and energy balance in metallic polycrystals. HAL, mars 2012.
- [2] M. A. Sutton, J.J. Orteu, H.W. Schreier. Image correlation for shape, motion and deformation measurements : basic concepts, theory and applications. Springer. 2009
- [3] D. Garcia, Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images. Phdthesis, Institut National Polytechnique de Toulouse-. 2001.
- [4] W. Burger, Zhang's Camera Calibration Algorithm: In-Depth Tutorial and Implementation. mai 2016
- [5] L. Weixian, W. Zhenzhong, Z. Guangjun. Affine calibration based on invariable extrinsic parameters for stereo light microscope. Optical Engineering 53, n^o 10 . mai 2014
- [6] S.M. Soloff, , R.J. Adrian, Z.C. Liu. Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry. Measurement Science and Technology 8, n^o 12. décembre 1997
- [7] P. Bing, Q. Kemaoy, X. Huimin, A. Anand . Two-Dimensional Digital Image Correlation for in-Plane Displacement and Strain Measurement: A Review. Measurement Science and Technology 20, n^o 6. 1 juin 2009
- [8] P. Bing. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals. Measurement Science and Technology 29, n^o 8. juin 2018
- [9] V. Valle, L. Laou, I. Léandry, S. Yotte, S. Rossignol, S. Hedan. Crack Analysis in Mudbricks under Compression Using Specific Development of Stereo-Digital Image Correlation. Experimental Mechanics 58, n^o 3. mars 2018
- [10] R. Salut. Etude des moyens de lithographie haute résolution pour la fabrication de résonateurs à ondes élastiques de surface : application aux sources embarquées. HAL. mai 2012
- [11] Y.L. Dong, , B. Pan. A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation. Experimental Mechanics 57, n^o 8. octobre 2017