

Mesure de la vitesse de déformation par ESPI pour l'étude de la localisation finale lors de l'essai de traction

J. PETIT, M. FRANÇOIS, G. MONTAY

Université de Technologie de Troyes (UTT), Institut Charles Delaunay, LASMIS, UMR CNRS 6279,
12 rue Marie Curie, BP 2060, 10010 Troyes

Résumé :

Le but de ce travail est d'analyser le champ de vitesse de déformation que subit un matériau pendant un essai de traction. L'ESPI est utilisé pour suivre en temps réel l'évolution de la déformation locale. Cette communication s'articule sur la caractérisation de la striction sur une zone d'étude relativement petite. L'apparition de deux bandes de localisation est mise en évidence et on montre qu'en fonction du rapport largeur/épaisseur des éprouvettes, une des deux bandes peut finir par devenir prédominante ; ceci se manifestant relativement tôt avant la rupture. Les deux cas sont étudiés par le biais de mesures quantitatives de vitesse de déformation.

Abstract :

The aim of this work is to analyze strain rate field which a material is subjected to during tensile test. ESPI is used to follow in real time the evolution of the local strain. This paper is based on the characterization of the necking on a relatively small area. The apparition of a two slip bands system is revealing and it's shown that one of these two bands can become predominant according to the width/thickness ratio of the samples; this phenomenon occurring relatively early before fracture. The two cases are studied by means of quantitative measurements of strain rate.

Mots clefs : ESPI, striction, vitesse de déformation, bandes de localisation, essai de traction.

1 Introduction

La localisation des déformations plastiques est un problème majeur dans les études liées à la mise en forme des matériaux et notamment dans la caractérisation des courbes limites de formages. On peut ainsi définir la localisation comme étant un phénomène précurseur de la rupture. Dans le cas des métaux ductiles et lors d'un essai de traction, cette localisation est généralement désignée par le terme de striction, dû au rétrécissement localisé et souvent important de section se produisant inévitablement avant la rupture du matériau.

Classiquement, on définit deux étapes au cours de la striction. Tout d'abord on trouve la striction diffuse qui se produit quand la force de traction a atteint son maximum. Les déformations, à l'échelle macroscopique, deviennent alors hétérogènes dans tout le matériau. Puis on trouve la striction localisée où les déformations s'organisent en se concentrant dans un système de deux bandes de localisation.

Beaucoup de publications traitent de ce sujet. En particulier, plusieurs modèles théoriques ont été développés depuis les années 1950 [1–4]. Afin de valider ces modèles, il est nécessaire de pouvoir mesurer les déformations sur des zones relativement larges. C'est en ce sens que les méthodes optiques sont de plus en plus utilisées pour étudier le comportement mécanique des matériaux, parce qu'elles donnent facilement accès à des champs de déformation. Un grand nombre de ces méthodes existent, on peut citer parmi elles, les méthodes interférométriques [5,6], la photoélasticité et les techniques de corrélation d'images [7], comme étant les plus adaptées à notre problème. Les deux

dernières sont aujourd'hui moins sensibles que les méthodes interférométriques à nos échelles d'investigation. C'est par conséquent une méthode interférométrique : l'ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry), qui a été choisie pour examiner les déformations durant l'essai de traction et caractériser la striction. Cette méthode permet de suivre l'évolution temporelle et spatiale de la déformation dans la zone analysée de l'éprouvette avec une haute résolution en temps et en espace.

Le but de ce travail est de mesurer la vitesse de déformation par ESPI, comme une quantité physique pertinente pour étudier finement la localisation finale. La zone d'étude, couvrant toute la largeur de l'éprouvette, est relativement petite, elle mesure moins de $5\text{mm} \times 4\text{mm}$. D'autres travaux ont déjà été menés sur les problèmes de localisation mettant également en avant la formation d'un système de deux bandes de localisation durant la striction [5,8] et une accélération brusque de la vitesse de déformation à la fois dans le cas de la traction et lors d'essais de gonflement hydrostatique [9,10].

Par ailleurs, la technique du décalage de phase a été utilisée pour obtenir, avec une meilleure résolution, les franges représentatives du déplacement de la matière. Ces figures de franges nous permettent ainsi de dresser avec une bonne précision des cartes de vitesse de déformation décrivant l'évolution de la localisation. Le processus de localisation des déformations est alors exploré jusqu'à la rupture et deux scénarii possibles de cette évolution sont mis en évidence dépendant du rapport géométrique des dimensions de l'éprouvette.

2 Présentation de l'essai

Deux échantillons en acier inoxydable 316L austénitique cubique faces centrées (*c.f.c.*) ont été examinés. Le premier (figure 1(a)), désigné par « éprouvette 1 », a été prélevé dans une tôle de $0,5\text{mm}$ d'épaisseur, taillée dans la direction de laminage. Le second, « éprouvette 2 » (figure 1(b)), découpé également dans la direction de laminage, provient d'une plaque de 1mm d'épaisseur. Les largeurs de ces deux échantillons sont également différentes, conduisant pour le premier à un rapport largeur/épaisseur de 10 et pour le second de 3,6. Les essais ont été effectués sur une machine de micro-traction équipée d'un capteur de force de 5kN , à une vitesse variant entre $5\mu\text{m/s}$ au début des expériences, à $0,1\mu\text{m/s}$ peu après l'apparition de la striction.

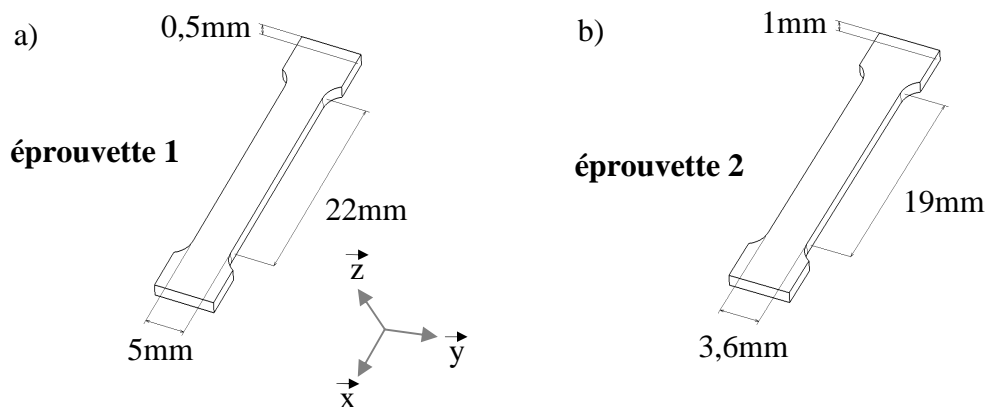


FIG. 1 – Schéma des éprouvettes.

Une photo du montage expérimental avec tous les éléments d'optique est présentée figure 2. De nombreux ouvrages sont consacrés à cette méthode [11–12]. Plus particulièrement dans notre cas, une source laser He-Ne de longueur d'onde $\lambda = 632,8\text{ nm}$ a été utilisée. Cette source envoie un faisceau laser qui est séparé en deux par une lame séparatrice. Les deux faisceaux ainsi générés sont dirigés vers l'échantillon par des miroirs et interfèrent à sa surface. L'angle α entre chaque faisceau incident et la normale à l'échantillon est identique. Le montage est par conséquent sensible au déplacement dans le plan (montage type Leendertz), avec un vecteur sensibilité \vec{s} parallèle à la direction de traction. Le vecteur sensibilité est défini par $\vec{s} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2$, où \vec{k}_1 et \vec{k}_2 sont les vecteurs d'onde des deux rayons incidents. Entre les miroirs et l'échantillon, chaque faisceau est étendu par une lentille de microscope et filtré à travers un diaphragme de $15\mu\text{m}$ de diamètre pour couvrir toute la surface de l'échantillon. Une caméra CCD ($1280\text{ pixels} \times 960\text{ pixels}$, monochromatique, 8 digits) surmontée d'un objectif de microscope (grossissement : $4\times$, ouverture numérique : $0,12$, distance focale : $30,8\text{mm}$)

enregistre les images de speckle. Un des miroirs est un miroir piézo-électrique, il permet d'associer la technique du décalage de phase temporel à l'ESPI, et par conséquent d'avoir accès à la phase en chaque pixel, conduisant à une information plus précise sur la valeur des déplacements.

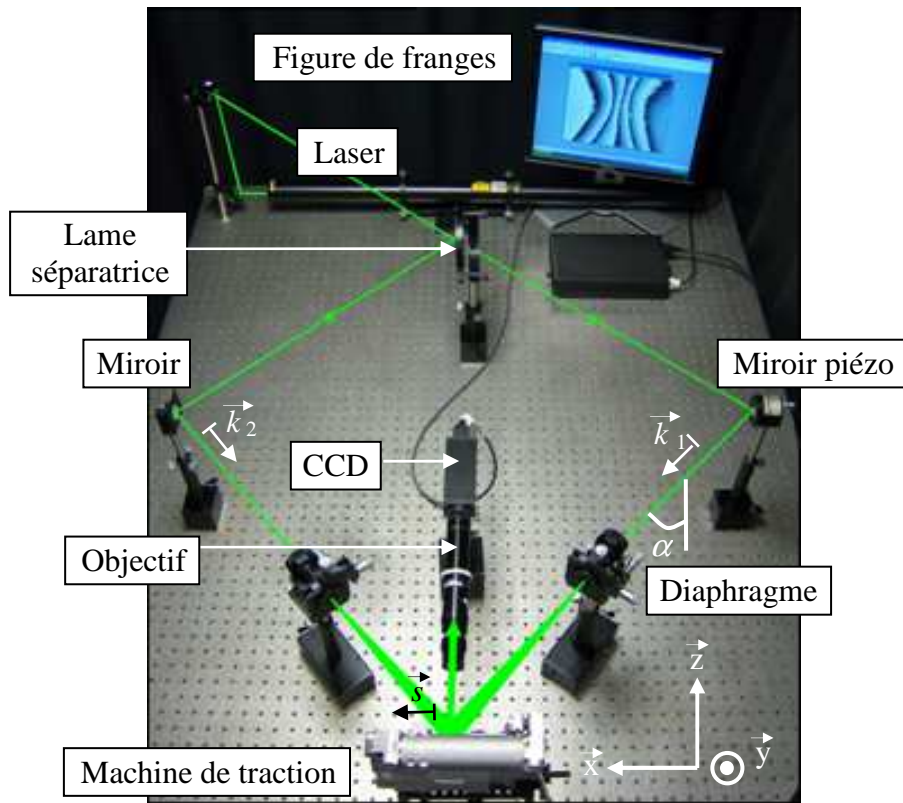


FIG. 2 – Photo du montage ESPI. Les traits de couleur verte ont été rajoutés pour visualiser la trajectoire du faisceau laser.

3 Détermination de la vitesse de déformation

Lorsque le matériau se déforme, un déplacement \vec{d} se produit entre deux images de phase, on obtient une différence de phase $\Delta\varphi$ [12] :

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} d_1 \sin\alpha, \quad (1)$$

où d_1 est la composante de \vec{d} parallèle à \vec{s} . Si $\Delta\varphi = 2\pi$, alors $d_1 = \|\vec{s}\| = s$ et l'équation (1) devient :

$$s = \frac{\lambda}{2 \sin\alpha}. \quad (2)$$

L'angle d'incidence est de 45° , donc la sensibilité du montage est de $0,447 \mu\text{m/frange}$.

Le déplacement relatif entre deux points A et B alignés avec \vec{s} (figure 3(a)) vaut :

$$u_{AB} = N_{AB} \cdot s, \quad (3)$$

où N_{AB} est le nombre de franges (pas nécessairement un entier) entre A et B obtenues après soustraction des deux images de phase.

La déformation moyenne entre les deux points s'exprimerait alors de la façon suivante :

$$\varepsilon_{AB} = \frac{u_{AB}}{l_{AB}}, \quad (4)$$

avec l_{AB} la distance entre les deux points. Et la vitesse de déformation moyenne correspondante serait :

$$\dot{\varepsilon}_{AB} = \frac{\varepsilon_{AB}}{\Delta t}, \quad (5)$$

avec Δt le temps écoulé entre les deux images de phase.

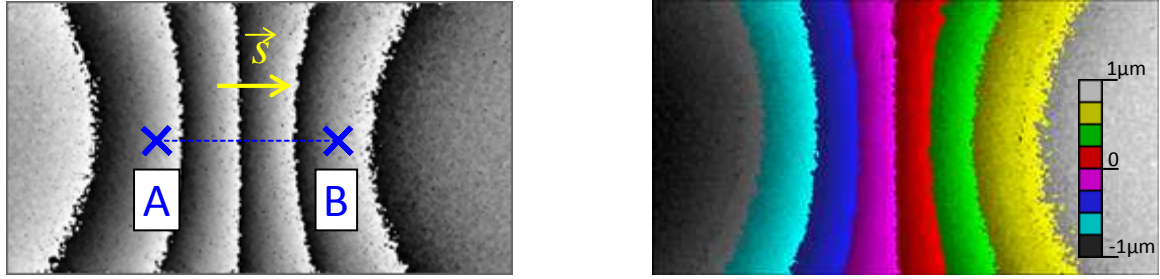


FIG. 3 – (a) Figure de franges obtenues après soustraction de deux images de phase et (b) la même figure démodulée et convertie en déplacement.

Dans notre cas nous avons cherché à obtenir des cartes de vitesse de déformation. Pour cela nous avons modélisé la vitesse de déformation globale prenant place dans la striction, par une pseudo-fonction de Voigt (PV) à deux variables et comportant dix paramètres, ceci compte tenu du fait de la forme inhérente au phénomène :

$$PV(x, y) = \dot{\varepsilon}_1^{max} \cdot \frac{v_0}{v_t} \left(\eta_1 \text{Exp} \left[-\text{Ln} \left(2 \right) \left(\frac{x - a_1 y - b_1}{B_1} \right)^2 \right] + \frac{1 - \eta_1}{1 + \left(\frac{x - a_1 y - b_1}{B_1} \right)^2} \right) + \dot{\varepsilon}_2^{max} \cdot \frac{v_0}{v_t} \left(\eta_2 \text{Exp} \left[-\text{Ln} \left(2 \right) \left(\frac{x - a_2 y - b_2}{B_2} \right)^2 \right] + \frac{1 - \eta_2}{1 + \left(\frac{x - a_2 y - b_2}{B_2} \right)^2} \right) . \quad (6)$$

Les indices 1 et 2 correspondent chacun à une bande de localisation. x et y sont les coordonnées d'un point à la surface de l'échantillon. La signification des paramètres, en posant $i=1$ ou 2 , est la suivante :

- $\dot{\varepsilon}_i^{max}$ est la vitesse de déformation maximale dans la bande i ,
- η_i et $1-\eta_i$ sont les poids des fonctions gaussienne et lorentzienne qui modélisent la déformation de la bande i , η_i est un réel compris entre 0 et 1,
- a_i est l'inclinaison de la bande i par rapport à l'axe de traction,
- b_i est une ordonnée à l'origine permettant de situer la bande i sur l'image,
- B_i est la largeur de la bande i .

De plus, le rapport $\frac{v_0}{v_t}$ permet de normaliser la vitesse de déformation par rapport à une vitesse de

référence v_0 choisie de manière arbitraire, v_t étant la vitesse de traverse au moment de la mesure. Le temps Δt écoulé entre deux images phasées est ici implicitement contenu dans les termes de vitesse de déformation maximale.

Les paramètres $\dot{\varepsilon}_i^{max}$, a_i et B_i ont donc une signification physique claire puisqu'ils définissent des grandeurs intrinsèques aux bandes. Ils ont en plus un caractère global car ils sont déterminés à travers toute la zone de striction.

Pour éviter une dérivation numérique des images de franges démodulées (figure 3(b)), c'est en fait l'intégrale de cette fonction qui est ajustée sur l'image complète des déplacements.

4 Résultats et discussion

Les figures 4 et 5 donnent, pour les éprouvettes 1 et 2 respectivement, la courbe de traction et une séquence de cartes de vitesse de déformation déduites à partir de figures de franges obtenues par ESPI et du modèle présenté dans la section précédente. Le plan d'observation pour l'obtention des cartes est le plan (x,y) , comme défini à la figure 1.

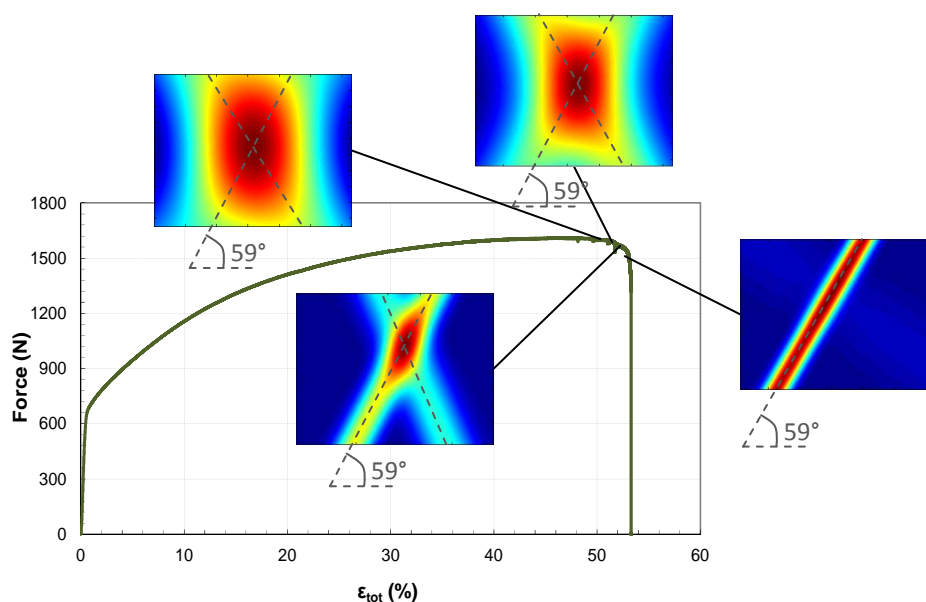


FIG. 4 – Courbe de traction force-déformation et séquences de cartes de vitesses de déformation relative à l'éprouvette 1.

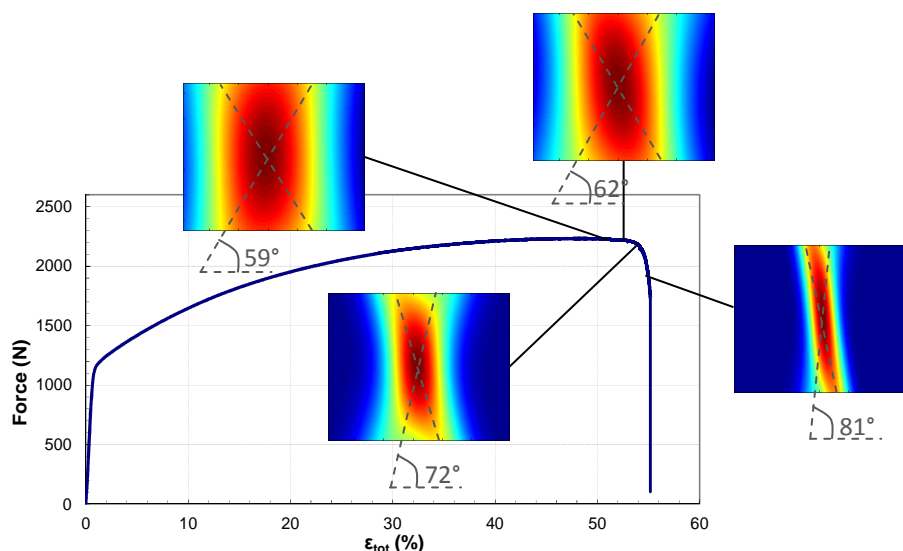


FIG. 5 – Courbe de traction force-déformation et séquences de cartes de vitesses de déformation relative à l'éprouvette 2.

Depuis début de l'essai jusqu'à l'apparition de la striction, ce qui comprend l'élasticité et toute la plasticité homogène, c'est-à-dire tout le domaine de déformation avant d'avoir atteint la force de traction maximale, seules des franges rectilignes et régulièrement espacées peuvent être observées suivant la longueur des éprouvettes. Ce phénomène, déjà observé dans [5,8], n'est pas présenté ici ; il conduirait à obtenir des cartes de vitesse de déformation uniformes. Durant la striction diffuse, des hétérogénéités dans le champ de vitesse de déformation commencent à apparaître. Néanmoins, celles-ci sont perceptibles uniquement suivant le sens de la longueur des éprouvettes [13].

En revanche, dès l'amorçage de la striction localisée, on constate clairement d'après les figures 4 et 5 et pour les deux échantillons, que les déformations se concentrent en un endroit bien précis de l'éprouvette sous la forme d'une croix. Cette croix est constituée par deux bandes de localisation, conformément au modèle. Dans un état de déformation plus avancé, on peut observer pour l'éprouvette 1 (de section $5 \times 0,5 \text{ mm}^2$) que l'une des bandes prend le dessus quelques temps avant la rupture, alors que pour l'éprouvette 2, élaborée dans le même acier mais avec une section différente ($3,6 \times 1 \text{ mm}^2$), aucune bande ne devient prédominante avant la fin de l'essai. Ceci démontre ainsi que deux développements très distincts de la striction sont possibles en fonction du rapport

largeur/épaisseur des éprouvettes et implique également des évolutions très différentes pour les paramètres de notre modèle (PV) suivant la forme des éprouvettes.

Par ailleurs, d'après les cartes de vitesse de déformation, il est intéressant de souligner le fait que cette vitesse est maximale au centre des bandes, qu'elle est identique suivant toute la longueur d'une bande et que la vitesse de déformation en chaque point de la zone de striction peut être déterminée par une simple somme arithmétique des vitesses des deux bandes.

Constatons en outre que l'orientation de la bande prédominante dans le cas de l'éprouvette 1 est très proche de l'inclinaison théorique de $54^{\circ}44'$ par rapport à la direction de traction prévue pour un matériau isotrope. Cette bande prédominante oriente complètement le sens de la rupture. A noter qu'ici, l'effet du laminage n'introduit qu'une très faible anisotropie. Pour l'éprouvette 2, aucune bande ne prend le dessus avant la fin de l'essai et les deux bandes tournent jusqu'à s'aligner presque perpendiculairement avec la direction de traction. De la même façon que pour l'éprouvette 1, la rupture s'oriente suivant l'inclinaison des bandes.

Enfin, des essais menés sur d'autres échantillons du même matériau, avec ou non les mêmes caractéristiques largeur/épaisseurs, ont permis de confirmer les résultats présentés dans ce papier et d'estimer de manière empirique le rapport limite marquant la transition entre les deux scénarii observés d'évolution de la striction. Ce rapport serait approximativement égal à 5 dans le cas de l'acier 316L.

5 Conclusion

L'ESPI a été utilisée avec succès pour obtenir des cartes de vitesse de déformation à différentes étapes de la localisation. Dans le cas d'un métal ductile 316L, l'hétérogénéité dans le champ de vitesse de déformation a été détectée après le maximum de force. Les cartes obtenues à partir de la striction localisée montrent que le phénomène de striction évolue à travers deux bandes de localisation croisées. En fonction du rapport largeur/épaisseur de l'éprouvette, deux modes d'évolution peuvent être observés. Pour un rapport grand, une des deux bandes prend le dessus sur l'autre avant la rupture du matériau, l'autre bande tend à disparaître complètement. La bande prédominante, dont l'orientation n'aura quasiment pas varié au cours de la striction, préfigure le caractère incliné de la rupture. Pour un rapport petit, les deux bandes coexistent et affichent un comportement symétrique jusqu'à la fin de l'essai. Celles-ci cessent de tourner, tendant à s'aligner perpendiculairement avec la direction de traction et impliquant une rupture perpendiculaire à l'axe de traction. Ce papier démontre par conséquent que pour déterminer complètement le comportement mécanique d'un matériau, l'aspect géométrique des éprouvettes est un élément essentiel à prendre en considération.

Références

- [1] Swift H.W., *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1, 1–18, 1952.
- [2] Hill R., *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1, 19–30, 1952.
- [3] Hill R., *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49, 2055–2070, 2001.
- [4] Rudnicki J.W., Rice J.R., *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 23, 371, 1975.
- [5] Guelorget B., François M., Vial-Edwards C., Montay G., *Materials Science & Engineering*, 415, 234, 2006.
- [6] Petit J., Montay G., François M., Strain, “Localisation Phenomenon Investigation on SMATed Stainless Steel Samples by Speckle Interferometry”, doi: 10.1111/j.1475-305.2009.00726.x2010.
- [7] Wattrisse B., Chrysochoos A., Muracciole J.-M., Nemoz-Gaillard M., *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 20, 189–211, 2001.
- [8] Petit J., Montay G., François M., *Materials Science Forum*, 614, 155–162, 2009.
- [9] Montay G., François M., Tourneix M., Guelorget B., Vial-Edwards C., Lira I., *Optic & Lasers Engineering*, 45, 222–228, 2007.
- [10] Montay G., François M., Tourneix M., Guelorget B., Vial-Edwards C., Lira I., *Journal of Materials Processing Technology*, 184, 428–435, 2007.
- [11] Jones R., Wykes C., *Holographic and Speckle Interferometry*, Cambridge University Press, 1989.
- [12] Cloud G., *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge University Press, 1995.
- [13] Petit J., Thèse de doctorat, UTT, 2010.