L'etude de comportement élastoplastique anisotrope de tôle d'emboutissage par l'utilisation de corrélation d'image (DIC)

F. ABBASSI^{1,2}, O. PANTALE², A. ZGHAL¹, S. MISTOU², R. RAKOTOMALALA²

¹Unité de recherché de Mécanique des solides des structures et des développements technologiques ESSTT, Tunis, Tunisie

²Equipe CMAO - Laboratoire de Génie de Production - ENIT, Tarbes, France

Abbassi.fethi@enit.fr

Résumé Ce travail a pour but d'étudier l'évolution de phénomène de striction et d'étudier le comportement d'une tôle anisotrope d'emboutissage par l'utilisation de technique de corrélation d'image numérique DIC (Digital Image Corrélation), cette technique assure la mesure du champ de déformation avec une grande précision ce qui nous a permis de mesurer les déformations sur une épaisseur de tôle de 2 millimètres. Cette étude a été réalisée par des essais de traction dans les trois directions 0° , 45° et 90° par apport à la direction de laminage sur des éprouvettes en acier S360 utilisé pour la fabrication des couvercles d'airbag. Les mesures sont effectuées par deux caméras CCD, puis les images capturées sont analysées par un logiciel commercial ARAMIS ce qui permet la détermination de déformations pour tous les points de la surface à chaque instant. Cette richesse d'information expérimentale s'avère particulièrement utile pour la validation non seulement globale mais aussi locale tel que la visualisation de localisation de déformations qui précède la rupture.

Keywords- mesure sans contact; Digital Image correlation (DIC); stériéocorrelation; mise en forme; characterisation. Striction.

I. INTRODUCTION

Une mesure précise et rapide du champ de déformation à la surface d'un corps reste primordiale pour l'ingénieur ou l'industriel lors d'identification de lois de comportement d'un matériau ou dans un processus d'obtention de pièce par procédés de mise forme par déformation plastique. Cet enjeu explique les nombreux travaux de recherches sur le développement des moyens de mesure de déformation. Parmi ces moyens les mesures par dépôt des grilles qui sont encore utilisées malgré les difficulté et le temps d'exécution de cette méthode les mesures par l'utilisation des moyens optiques... Les industriels cherchent la méthode qui a le plus des avantages concernant soit leur simplicité de mise en œuvre, soit leur dynamique de mesure, soit leur grande précision, mais reste difficile de trouver celles qui combinent tous ces avantages.

L'utilisation de mesure sans contact en appliquant la technique de corrélation d'image en 2D et la stéréo-corrélation est un outil efficace pour l'étude de phénomène de striction qui reste l'un parmi les problèmes couramment présent lors d'un processus de mise en forme des tôles (emboutissage, hydroformage...). La stéré-corrélation sert à développer des cartographies d'éprouvette de traction en 3D qui montre l'évolution de striction lors d'un essai de traction. En 1885, Considère [7] a proposé le premier critère qui prédit la striction diffuse en traction, dite critère de force maximale selon ce critère la striction se manifeste lorsque la force de traction passe par un maximum ce qui se traduit par :

$$\sigma = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \tag{1}$$

Swift [8] a repris l'idée de force maximale et l'appliqué au cas de tôles minces pour étudier la striction diffuse l'évolution de ce phénomène permet le passage a une deuxième étape dite striction localisé définit par Hill [9].

II. METHODES DE MESURE DE DEFORMATIONS

Il existe une grande variété de méthodes de mesure de déformation sur la surface d'une pièce lors de déformations à savoir

- les mesures avec contact sont des méthodes classiques moins précises mais aussi sont beaucoup moins couteux que les méthodes optiques. Les données récupérées par l'utilisation de ces méthodes de mesures sont le déplacement de deux mores de machine de traction et plus localement l'allongement de l'éprouvette en utilisant des extensomètres.
- la méthode de mesure par réseau de grilles gravées sur la surface de la pièce à déformer, dans cette méthode, la détermination de champ de déformation en mesurant le réseau déformé et en le comparant avec les grilles non déformées. Cette méthode est largement utilisée soit avec des grilles circulaires [1], [2], [3], [4], ou rectangulaires, [5], [6]. Plusieurs travaux sont développés dans le but d'automatiser la mesure des grillées après déformation tel que le logiciel ASAME [10], Automated Strain Analysis and Measurement Environment, cet outil capable de déterminer les coordonnées 3D des points d'une grille localisée sur la surface d'une tôle déformée pour remonter aux déformations sur la surface de la tôle. Une autre méthode aussi a été développée par [14] qui consiste a

connecté un rugosimètre avec un ordinateur pour mesurer les déformations des grilles.

En 1983, les travaux de Sutton et al [12] représentent la première contribution d'utilisation de méthode de résolution numérique pour obtenir le champ de déplacement et de déformation d'un corps en utilisant une technique de corrélation d'images numériques. Suite à ces travaux plusieurs développements dans ce domaine qu'ont été présentés dans les travaux de thèse de Mguil [13]. Ces techniques sont aussi largement utilisées pour la caractérisation des matériaux destinés pour la mise en forme [14], [15], [16].

Les mesures par la méthode des grilles sont encore largement utilisées, dans ces dernières années des importants progrès dans cette méthode au niveau d'automatisation de mesure des cercles déformées sur les surfaces des pièces. Malgré le coût de mesure par l'utilisation de méthode DIC elle est de plus en plus utilisée à cause de sa grande précision et la rapidité de dépouillements des résultats.

III. MÉTHODE DU MESURE SANS CONTACT

A. Méthode de corrélation d'image en deux dimensions

La corrélation d'images permet la mesure de champs de déplacements d'une surface plane : une caméra enregistre une séquence d'images d'un objet plan qui subit des déformations planes. Les déplacements de points répartis à la surface de l'objet sont calculés à partir de l'analyse des images de la séquence. Étant donné deux images correspondant à deux états de déformation d'un objet, pour déterminer le correspondant d'un pixel de la première image dans la seconde, on mesure la ressemblance entre deux pixels en calculant un score de corrélation (critère de ressemblance) déterminé sur leur voisinage. L'appariement d'images acquises par une seule caméra, à des instants différents, sur un objet qui se déforme est appelé appariement temporel, de suivi de pixel ou de tracking. De par son principe, la technique de corrélation ne peut fonctionner correctement qu'avec des objets présentant une surface avec une texture suffisamment aléatoire. Si l'objet n'est pas naturellement texturé ou si sa texture n'est pas suffisamment discriminante, différentes techniques existent pour permettre l'utilisation de la corrélation dont la projection de peinture.

Une caméra CCD (Charge Coupled Device) permet d'acquérir des images numériques avec une définition de 1280 par 1024 pixels. Ces images sont ensuite traitées avec le logiciel ARAMIS (GOM France). Grâce à ce dispositif il est possible de mesurer les déplacements et les déformations à la surface d'un objet avec une résolution de 200 µm/m en déformations. Le logiciel ARAMIS est capable de reconnaître les points d'une image par analyse des niveaux de gris. Cela est rendu possible grâce à l'application sur l'objet à mesurer de peintures blanche et noire qui forment des niveaux de gris variables sur la surface de l'objet. A chaque pixel des capteurs CCD correspond une valeur de niveau de gris codée sur 8 ou 12 bits. Une suite de plusieurs pixels pris sur une même ligne forme une séquence de niveaux de gris appelée distribution de niveaux de gris. Le principe fondamental réside dans le fait que les distributions ne varient pas au cours de la déformation de l'objet. Il suffit donc de suivre ces distributions de niveau de gris dans leur mouvement pour avoir les déplacements de l'objet. En pratique, cela est rendu possible grâce à des domaines de corrélation qui sont des zones regroupant $n \times n$ pixels.

La méthode de corrélation d'image numérique dite aussi DIC est largement appliquée pour mesurer le champ de déplacements. En comparant la corrélation locale de deux images, la relation entre l'image déformée et non déformée a pu être identifiée comme montre la figure 1.

Le point central avant déformation que sera le point P* après déformation, et la fonction discrète qui représente le niveau de gris de l'image initiale est notée f(x,y), celle de l'image finale $f^*(x^*,y^*)$.

$$f^{*}(x^{*}, y^{*}) - f(x + u(x, y), y + v(x, y)) = 0$$
(2)

où u(x, y) et v(x, y) représentent le champ de déplacement homogène pour un motif.



Figure 1. Evolution d'un motif de l'image initiale dans l'image déformée [13]

Dans le logiciel ARAMIS le champ de déplacement pour un motif est considéré homogène et bilinéaire en x et y tel que :

$$u(x, y) = a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \cdot x \cdot y + a_4 v(x, y) = b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_3 \cdot x \cdot y + b_4$$
(3)

Il contient les termes de translation de corps rigide (a4 et b4), les termes d'élongations (a1, b1 et a2, b2) ainsi que les termes de cisaillements (a3 et b3).

B. Méthode de stéréo-corrélation d'image (3D)

Le suivi de tels essais par la méthode de stéréo-corrélation d'images, méthode basée sur les principes de la photogrammétrie, permet d'accéder de manière fine aux champs de déplacements et de déformations sur la totalité de la surface mesurée [18]. La méthode de stéréo-corrélation n'est possible que par l'utilisation de deux caméras CCD permettent d'acquérir des images numériques en même temps et par l'utilisation d'un logiciel de reconnaissance d'image avec ce dispositif il est possible de mesurer la déformation sur la surface de l'éprouvette avec une résolution de 1000 à 2000 μ m/m [18]. Cette méthode est plus délicate que la précédente et elle nécessite une étape de calibration consiste à déterminer les paramètres de la fonction reliant les cordonnées 3D de points de l'espace et les coordonnées 2D de ces points projetés sur les deux plans images : la distance et l'angle entre les deux caméras. La reconstruction 3D de l'objet est déterminée à l'aide des coordonnées 2D des deux photos prises de l'objet et de la position de la caméra (figure 2) cette méthode du calcul est connue sous le nom d'intersection spatiale [19].



Figure 2. Méthode de l'intersection spatiale

IV. ETUDE EXPÉRIMENTALE

A. Essais de traction

L'essai de traction reste le premier outil pour la caractérisation des tôles, il permet ainsi, l'identification des propriétés du matériau en termes de limites élastiques, coefficient de Lankford et la courbe d'écrouissage. Ces essais ont été réalisés sur une machine de traction équipée d'un capteur d'effort de 1000 N. Les éprouvettes de traction sont découpées suivant trois axes 0° , 45° et 90° par rapport au sens de laminage en respectant la géométrie indiquée dans la figure 3



Figure 3. Géométrie des éprouvettes de traction

La mesure par corrélation d'images nécessite un dépôt de peinture sur l'échantillon à tester dite mouchtie: pulvérisation d'une couche de peinture blanche uniforme à l'aide d'une bombe de peinture du commerce, pulvérisation de petites taches noires à l'aide d'une bombe de peinture, les mesures de champs de déformation et de déplacement dans ces essais sont assurer par l'installation de cameras CCD sur la machine de traction et accusation des résultats sous forme des images a traitées et de valeur de chargement pour la détermination de la relation entre déformations contraintes. (Figure 4)



Figure 4. Montage de stéréo-corrélation lors d'essai de traction

B. Identification de loi d'écroissage

Plusieurs expressions sont proposées pour décrire la courbe expérimentale de la relation entre contraintes déformations. Ces fonctions analytiques souvent définies par essai de traction dans la direction de laminage [17].

Hollomon
$$\sigma = K\varepsilon^n$$
 (4)

Ludwik
$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n$$
 (5)

Swift $\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$ (6)

Samanta
$$\sigma = \sigma_0 + K \ln \varepsilon$$
 (7)

Voce $\sigma = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_0) \exp(-n\varepsilon)$ (8)

Misiolek
$$\sigma = K\varepsilon^n \exp(-n\varepsilon)$$
 (9)

Dans ces travaux on a choisi la loi d'écrouissage de type Swift qui décrit bien la relation entre contrainte déformation figure 5.

Avec ε_0 =0.0173 K= 740.12 et n=0.175



Figure 5. Relation contraintes déformations

C. Loi de comportement

Le comportement élastoplastique d'un matériau est décrit par une enveloppe appelée surface de charge initiale qui sépare le domaine élastique et le domaine plastique. Après le critère isotrope proposé par Von Mises, Hill [17] est le premier à avoir proposé un critère qui tient compte de l'anisotropie initiale des tôles. Ce critère est généralement formulé dans les axes d'orthotropes (x, y z) :

$$\overline{\sigma}^{2} = F \cdot (\sigma_{y} - \sigma_{z})^{2} + G \cdot (\sigma_{z} - \sigma_{x})^{2} + H \cdot (\sigma_{x} - \sigma_{y})^{2}$$

$$+ 2L\sigma_{yz}^{2} + 2M\sigma_{xz}^{2} + 2 \cdot N \cdot \sigma_{xy}^{2}$$
(10)

Avec H, F, G L, M, et N : sont les paramètres de la fonction de Hill'48 qui déterminent la forme de la surface de charge et son anisotropie.

Le cas d'emboutissage un état de contrainte plane σ_z, σ_{yz} ,

$$\sigma_{xy}$$
 et σ_{xz} sont nuls,

Dans ce cas le critère de Hill s'écrit sous la forme :

$$\overline{\sigma}^{2} = (G+H) \cdot \sigma_{x}^{2} + (F+H) \cdot \sigma_{y}^{2} - 2 \cdot H \cdot \sigma_{x} \cdot \sigma_{y} + 2 \cdot N \cdot \sigma_{xy}^{2} \quad (11)$$

Dans le cas général trois essais à faire pour la détermination des paramètres de surface de charges, ces essais suivants les directions 0° , 45° et 90° par apport à la direction de laminage.

Pour un essai de traction sur une éprouvette orientée d'un angle α par rapport au sens de laminage la contrainte équivalente est définie par :

$$\frac{-\sigma_{\alpha}}{\sigma_{\alpha}} = \frac{\sigma_{0}}{H + (2N - F - G - 4H)\sin^{2}\alpha\cos^{2}\alpha + (F\sin^{2}\alpha + G\cos^{2}\alpha)}$$
(12)

et le coefficient de Lankford est exprimé comme suite :

$r(0) = \frac{H}{G} = r_0$	r(0) = 1.58
$r(90) = \frac{H}{F} = r_{90}$	r(90) = 1.56
$r(45) = \frac{N}{F+G} - \frac{1}{2} = r_{45}$	r(45) = 1.88

La résolution de ces équations permet la détermination des coefficients de la fonction de charge Hill 48 [8].

$F = \frac{r_0}{r_{90} \left(1 + r_0\right)}$	$G = \frac{1}{1 + r_0}$
$H = \frac{r_0}{1 + r_0}$	$N = \frac{(1+2r_{45})(r_0 + r_{90})}{2r_{90}(1+r_0)}$

V. RSULTATS ET DISCUSSION

La richesse d'information expérimentale s'avère particulièrement utile pour la validation non seulement globale

mais aussi locale telle que la visualisation de localisation de déformations comme montre les deux figures suivantes dans la figure 6 on remarque que la déformation est encore homogène sur la surface de l'éprouvette. Lorsque la déformation croît on observe nettement la localisation de déformation au milieu de l'éprouvette sur la figure 7 qui représente les résultats juste avant la rupture



Figure 6. Déformations sur la surface de l'éprouvette au début de l'essai (déformation homogène)



Figure 7. Localisation des déformations qui précèdent la rupture.

Les résultats de traitement d'images capturées sur la surface de l'éprouvette sont présentés dans figures 6 et 7 et qui montrent la localisation de déformation. Le même phénomène on peut le visualiser par la deuxième technique dite stéréocorrélation sur les cartographies obtenus par le traitement de deux paires d'images avant et après déformation capturées par deux caméras en se basant sur le principe de photogrammétrie en utilisant l'outil commercial ARAMIS Figure 8. Si on superpose les cartographies avec la courbe de contraintesdéformations on remarque que ces résultats traduisent exactement l'idée de Considère, la phrase exacte de Considère dans la page 593 [7], est: "a un certain moment qui correspond au début de la striction, le barreau est en équilibre instable. L'expérience prouve que l'effort total atteint alors un maximum et décroit ensuite".



Figure 8. Cartographie d'éprouvette de traction avec l'apparition de phénomène de striction.

Dans un essai de traction sur des matériaux en tôles minces une diminution symétrique de largeur débute au milieu de l'éprouvette ce qu'on appelle striction diffuse définie par Swift [8], la continuation de l'allongement permet le passage au deuxième phénomène dite striction locale qui a été définie par Hill. L'application de méthode DIC permet la visualisation de ces différentes étapes d'évolution de striction. A un moment donné de la déformation on constate que les points du surface de l'éprouvette entrent progressivement dans un état déformation non homogène jusqu'au l'apparition d'une bande de localisation de déformation, Au niveau de la quelle, la matière s'écoule selon un mode de déformation plane, figure 9.



Figure 9. (a) Mécanisme de rupture, (b) résultat de corrélation

CONCLUSION

L'utilisation des moyens optiques (cameras CCD a haute résolution) et la technique de corrélation et stéréo-corrélation appliqués par le Logiciel ARAMIS est un moyen efficace pour l'étude de comportement de la tôle ainsi que pour la visualisation de phénomène de striction et son évolution lors d'essai de traction. Par ces équipements la mesure des déformations a chaque instant dans tous les points de la surface de l'éprouvette est possible par un choix du nombre des images capturées lors d'un essai, cette technique est largement utilisée a cause de sa simplicité de mise en œuvre et sa précision (de 10^{-3} mm).

En comparant les conditions d'essai de traction et la courbe d'écrouissage on constate que le déclenchement de localisation de déformation est correctement prédit par le critère d'effort maximal.

REFERENCES

- [1] S.P. Keeler, "Circular grid systems: a valuable aid for evaluation sheet forming", Sheet Metal Ind. 45 (1969) 33.
- [2] Q.-C. Hsu "Comparison of different analysis models to measure plastic strains on sheet metal forming parts by digital image processing", International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) 515–521
- [3] S. Natarajan, S. Venkataswamy, P. Bagavathiperumal "A note on deep drawing process: numerical simulation and experimental validation", Journal of Materials Processing Technology 127 (2002) 64–67
- [4] X.Y. Wang, J.C. Xia, G.A. Hu, Z.J. Wang, Z.R. Wang Sheet bulging experiment with a viscous pressure-carrying medium" Journal of Materials Processing Technology 151 (2004) 340–344
- [5] Naoki Takano, Masaru Zak, Reiko Fujitsu, Kazuaki Nishiyabu "Study on large deformation characteristics of knitted fabric reinforced thermoplastic composites at forming temperature by digital image-based strain measurement technique", Composites Science and Technology 64 (2004) 2153–2163
- [6] Abdelhakim Cherouat, Jean Louis Billoe, "Mechanical and numerical modelling of composite manufacturing processes deepdrawing and laying-up of thin pre-impregnated woven fabrics", Journal of Materials Processing Technology 118 (2001) 460–471
- [7] Concidère A. Mémoire sur l'emploi du fer et de l'acier dans les constructions, annales des ponts et chassées,(ser. 6) 9, pps.574, 1885.
- [8] H. W. Swift "plastic instability under plane stress" Journal of the Mechanics and physics of Solids, vol. 1, pp 1 to 18, 1952.
- [9] R. Hill, « on discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets » journal of the mechanics and physics of solids, 1952, vol. 1, pp. 19 to 30.
- [10] Manthey D.W., Lee, D. Recent Developments in a Vision Based Surface Strain Measurment System. Journal of Metal, juillet 1995, Vol 47, p. 46-49
- [11] Lagattu F, Brillaud J, Lafarie-Frenot M. High strain gradient measurements by using digital image correlation technique. Mater Character 2004;53:17–28.
- [12] Sutton M. A., Wolters W. J., Peters W. H., Ranson W. F., Mcneill S. R. Determination of displacements using an improved digital correlation method. Image and Vision Computing, août 1983, Vol. 1, N° 3, p. 133-139
- [13] Mguil-Touchal Sihem « Une technique de corrélation directe d'image numériques application à la détermination de courbes limites de formage et proposition d'un critère de striction» thèse doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon ,1997.

- [14] Dumoulin S. « De l'utilisation d'une loi monocristalline en vue de la caractérisation du comportement plastique du multicristal d'aluminium » Thèse doctorat université de savoie, 2001
- [15] David Lecompte, Arwen Smits, Hugo Sol, John Vantomme, Danny Van Hemelrijck, «Mixed numerical–experimental technique for orthotropic parameter identification using biaxial tensile tests on cruciform specimens» International Journal of Solids and Structures xxx (2006) in press
- [16] Dumoulin S. Tabourot L., Chappuis L., Vacher P. and Arrieux R., "Determination of the equivalent stress-equivalent strain relation of a sample of copper in tensile loading" journal of Materials Processing Technology 133, pp 79-83 (2003).
- [17] M. Ben Tahar « Contribution a l'etude et la simulation du procede d'hydroformage » thèse doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 2005
- [18] P. Vialettes, J.M. Siguier, O. Dalverny, S. Mistou, M. Karama et F. Petitjean, "Modélisation numérique et expérimentale du comportement de sous-ensembles de ballons pressurisés stratosphériques », Mécanique & Industries 6, 245–255 (2005).
- [19] Manuel d'utilisation du système Aramis V.4.7 commercialisé par GOM mbH





Figure 6. L'évolution du phénomène de striction au cours d'un essai de traction (stéréo-corrélation)