

Manifestation de l'effet Portevin-Le Châtelier en cisaillement simple

J. COËR^a, P.Y. MANACH^a, H. LAURENT^a, S. THUILLIER^a

a. LIMATB, Université de Bretagne-Sud, BP 92116, 56321 Lorient, France

Résumé :

Les alliages Al-Mg sont connus pour présenter un effet Portevin-Le Châtelier (PLC) à température ambiante, caractérisé par des oscillations sur la courbe d'écoulement et une déformation plastique localisée dans des bandes au cours de la déformation globale. Les courbes d'écoulement d'un alliage AA 5754-O lors d'essais de cisaillement simple sont étudiées pour différentes vitesses de déformation. Il est montré que l'effet PLC peut être observé pour ce type de trajet de déformation. Des observations de la surface des éprouvettes en utilisant une technique de corrélation d'images permettent l'étude de la nature et de la cinématique des bandes en fonction de la vitesse de déformation en cisaillement. Enfin, des simulations numériques par éléments finis utilisant le modèle de McCormick [1] sont présentées pour expliquer la cinématique des bandes PLC observées expérimentalement.

Abstract :

Al-Mg alloys are known to exhibit Portevin-Le Châtelier (PLC) effect at room temperature, characterized by serrations on the flow curve and a localized plastic strain in bands occurring during the overall deformation. The jerky flow in an AA 5754-O alloy during simple shear tests for various strain rates at room temperature is studied. It is shown that the PLC effect can be observed for such strain path. Direct observations of the sample surface using digital image correlation allow the study of the type and the kinematics of the bands associated to plastic instabilities as a function of shear strain and shear strain rate. Finally, finite element numerical simulations using the McCormick model [1] are presented to explain the kinematics of the PLC bands observed experimentally.

Mots clefs : Effet Portevin-Le Châtelier ; Essais de cisaillement ; Alliages d'aluminium

1 Introduction

Les alliages d'aluminium de la série 5000 (Al-Mg) pourraient avantageusement remplacer les alliages de la série 6000 (Al-Mg-Si), plus coûteux, notamment dans la fabrication des ouvrants automobiles. Cependant, l'effet Portevin-Le Châtelier (PLC) qui se manifeste dans ces alliages au cours de leur déformation plastique freine grandement leur utilisation pour les pièces d'aspects. Il conduit notamment à une diminution de la formabilité et il est à l'origine de marques donnant un aspect rugueux aux pièces obtenues. Par exemple, les alliages Al-Mg sont connus pour présenter cet effet PLC à température ambiante, caractérisé par des oscillations sur la courbe d'écoulement et une déformation plastique localisée dans des bandes au cours de la déformation globale. Ce phénomène est dû au vieillissement dynamique, une interaction entre les atomes de soluté de magnésium et les dislocations mobiles [2]. Bien que de nombreuses études de l'effet PLC aient déjà été réalisées, le phénomène a été observé principalement en traction. Compte tenu des différents trajets de déformation rencontrés dans les procédés de mise en forme des tôles par exemple, il semble intéressant d'élargir les connaissances sur les conditions d'apparition de l'effet PLC pour d'autres trajets de chargement.

Du point de vue de la modélisation, un modèle mécanique établi par McCormick [1] et modifié dans plusieurs articles [3, 4] est largement utilisé pour simuler le vieillissement dynamique et l'effet PLC.

Ce modèle est basé sur une approche élastoviscoplastique isotrope, dans laquelle une variable interne supplémentaire appelée temps d'activation est introduite [5]. Bien que ce modèle ait été récemment étendu au cas anisotrope [6], il est systématiquement utilisé et validé à partir de résultats en traction, essentiellement à cause du manque de données expérimentales pour d'autres trajets de déformation. Dans ce travail, les courbes d'écoulement d'un alliage AA 5754-O lors d'essais de cisaillement simple sont étudiées pour différentes vitesses de déformation. Il est montré que l'effet PLC peut être observé pour ce type de trajet de déformation. Des observations de la surface des éprouvettes en utilisant une technique de corrélation d'images permettent l'étude de la nature et de la cinématique des bandes en fonction de la vitesse de déformation en cisaillement. Enfin, des simulations numériques par éléments finis utilisant le modèle de McCormick [1] sont présentées pour expliquer la cinématique des bandes PLC observées expérimentalement.

2 Caractérisation expérimentale

Le dispositif expérimental de cisaillement défini dans [7] est adapté sur une machine de traction Shimadzu AG-50kNG selon l'encadré de la Fig.1. Le matériau est une tôle laminée d'alliage d'aluminium Al-3% Mg (AA5754-O), d'épaisseur $e = 1$ mm. L'alliage est recuit et contient les éléments suivants (% poids) : Mg (2.6-3.6), Mn (≤ 0.5), Si (≤ 0.4), Fe (≤ 0.4), Cr (≤ 0.3) et Cu (≤ 0.1), Al étant la balance. Les éprouvettes sont de forme rectangulaire de longueur $L = 60$ mm et de largeur $l = 15$ mm. Elles sont positionnées dans le dispositif de cisaillement et serrées de part et d'autre de l'axe de traction par l'intermédiaire de mors. Le mors de gauche se déplace vers le haut tandis que le mors de droite reste fixe, induisant ainsi une sollicitation de cisaillement simple dans la zone utile de largeur $h = 3$ mm située entre les deux mors. La contrainte de cisaillement est déterminée par $\tau = F/Le$, où F est la force de cisaillement [8].

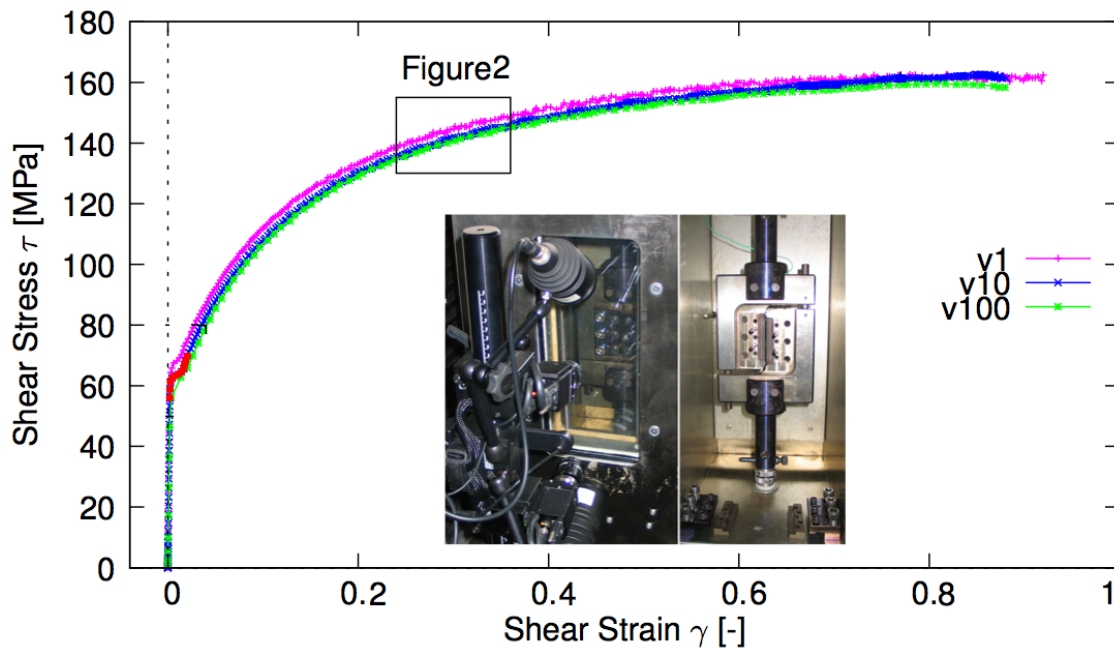


FIGURE 1 – Courbes contrainte-déformation en cisaillement d'un alliage AA5754-O pour les 3 vitesses de déformation v_1 , v_{10} et v_{100} . Le rectangle encadre la région observée sur la figure 2. Des photos du dispositif de cisaillement et de la mesure optique sont insérées dans la figure

La mesure de la déformation en cisaillement γ est obtenue en utilisant un système de mesure optique par corrélation d'images (Aramis GOM) dont les conditions opérationnelles sont décrites dans [7]. La direction de laminage est alignée avec la direction du cisaillement et des essais monotones ont été réalisés à température ambiante pour trois vitesses de déformation : $\dot{\gamma} = 1.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (v_1), $\dot{\gamma} = 1.2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (v_{10}) et $\dot{\gamma} = 1.25 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ (v_{100}). Le champ de déformation en cisaillement γ_{loc} est homogène dans la zone cisailée, grâce au rapport L/h important. Cependant, des effets de bord inévitables sont

observés à proximité des bords libres de la zone utile. Ainsi, la déformation de cisaillement γ est mesurée comme la moyenne de γ_{loc} dans la région homogène du champ de déformation, en éliminant les valeurs situées au delà de la longueur $a = 48$ mm définie sur la Fig.2. La précision de cette mesure est de l'ordre de 10^{-4} . Le champ de vitesses de déformation $\dot{\gamma}_{loc}$ est calculé grâce à la mesure optique par la différence entre les valeurs de γ_{loc} pour deux images consécutives, divisé par l'incrément de temps séparant ces images. Il est à noter que le champ de vitesses de déformation ainsi calculé reste homogène en cisaillement pour d'autres matériaux qui ne présentent pas d'instabilités plastiques. En raison du caractère aléatoire de la déformation, le test présenté pour chaque vitesse de déformation est choisi parmi au moins trois essais reproductibles en termes de courbes contrainte-déformation.

Les courbes contrainte-déformation en cisaillement pour les différentes vitesses de déformation sont présentées sur la Fig.1. Conformément aux observations en traction, les courbes présentent pour toutes les vitesses, un plateau à la contrainte seuil et des oscillations caractéristiques de l'effet PLC. En outre, le matériau présente également une sensibilité négative à la vitesse de déformation [9]. Sur ces courbes, une zone particulière est mise en évidence pour être étudiée en détail dans la Fig.2.

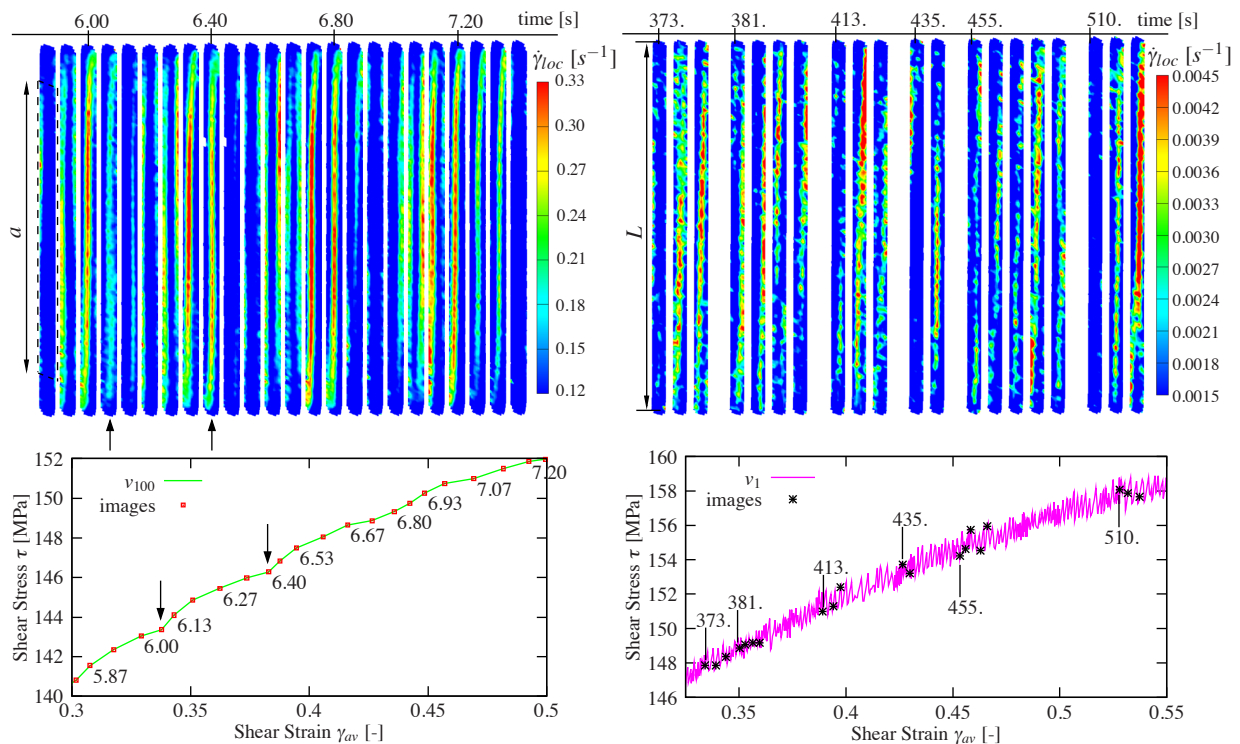


FIGURE 2 – Zooms de la région encadrée Fig.1 : les images correspondent à la vitesse de déformation respectivement pour le test v_{100} (à gauche) et pour le test v_1 (à droite) en fonction du temps

Les images présentées Fig.2 sont obtenues dans la région encadrée de la figure 1 pour les vitesses v_{100} et v_1 . Sur la partie gauche correspondant à v_{100} , on observe que pour $t = 5.87$ s, le champ de vitesses de déformation $\dot{\gamma}_{loc}$ est homogène. Pour $t > 5.87$ s, la propagation d'une bande de localisation est clairement observée, caractérisée par une augmentation importante de la vitesse de déformation dans cette bande. L'apparition de la bande coïncide avec une chute de la contrainte sur la courbe d'écoulement. Enfin, lorsque $t > 6.13$ s, le champ de vitesses de déformation redevient homogène, indiquant la fin de la propagation de la bande. Lorsque les déformations sont petites ($\gamma < 0.3$), les bandes sont parallèles à la direction de la contrainte de cisaillement. Leur apparition a lieu à proximité d'un mors, dans la partie de l'éprouvette soumise à une contrainte de compression, puis elle se propage dans l'éprouvette. Contrairement à ce que l'on observe en traction, où la direction de propagation est parallèle à la direction de la contrainte de traction, la bande se déplace ici perpendiculairement à la direction de la contrainte de cisaillement. Pour les déformations plus importantes, l'orientation des bandes s'incline

selon une diagonale reliant les deux zones de l'éprouvette en compression. La partie droite de la figure 2 présente plusieurs images obtenues dans la même gamme de déformation, mais pour la vitesse de déformation v_1 . La cinématique des bandes est similaire, bien que l'intensité des bandes soit moins marquée que pour le test v_{100} et l'amplitude des oscillations, plus importante.

On observe que la vitesse de déformation dans la bande pour v_1 et v_{100} est environ 3 fois plus grande que la vitesse imposée. Selon [5], l'amplitude des oscillations permet de différencier les types de bandes. En effet, la nature des bandes en traction est classée en types A, B ou C dont les propriétés dépendent de la vitesse de déformation ou de la température. Les bandes de type A sont observées pour les vitesses de déformation importantes et se propagent continuellement conduisant à de petites oscillations sur les courbes d'écoulement. Les bandes de type B se produisent à des vitesses de déformation intermédiaires et se forment séquentiellement conduisant à des chutes de contrainte plus importantes et plus régulières que pour le type A. Enfin, les bandes de type C, observées à des vitesses de déformation plus faibles, apparaissent au hasard le long de l'échantillon engendrant de grandes oscillations sur les courbes. En utilisant cette classification, les bandes du test v_1 sont similaires aux bandes de type B observées en traction, tandis que celles des tests v_{10} et v_{100} s'apparentent aux bandes de type A.

3 Simulation numérique

La loi de comportement est basée sur le modèle élastoviscoplastique de McCormick [1]. L'écrouissage et le critère de plasticité sont isotropes, l'évolution de l'écrouissage étant gouvernée par la déformation plastique cumulée. L'anisotropie et l'écrouissage cinématique peuvent être pris en compte en utilisant un critère de plasticité anisotrope ou un écrouissage mixte dans l'expression de la fonction de charge. L'effet PLC est décrit par une variable interne appelée temps d'activation permettant de reproduire l'écrouissage supplémentaire engendré par le vieillissement dynamique [6]. L'identification des paramètres est réalisée par optimisation inverse en considérant un essai de cisaillement homogène, ce qui permet d'obtenir les bornes basses et hautes des oscillations de la courbe d'écrouissage. La base expérimentale est constituée des essais de cisaillement précédents à différentes vitesses de déformation. Un coefficient est affecté à chaque variable observable, dont la valeur pour la contrainte de cisaillement est $\Delta s_{12} = 3$ MPa. Plusieurs paramètres du modèle sont fixés, $E = 70$ GPa, $\nu = 0.3$ et d'autres sont tirés de la littérature w, n [6]. Les valeurs de l'ensemble des coefficients du modèle sont données dans le tableau 1.

E	ν	\dot{p}_0 (s^{-1})	K	σ_y	Q	b	$P_1 C_m$	P_2	α	n	w
70000	0.3	0.0001	0.1	110	160	11	15	3.9	0.5	0.33	0.0001

TABLE 1 – Paramètres matériaux du modèle de McCormick ($E, K, \sigma_y, Q, P_1 C_m$ en MPa)

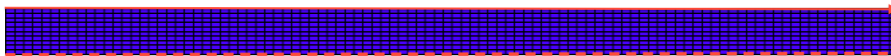


FIGURE 3 – Maillage et conditions limites de l'essai de cisaillement numérique. Les nœuds le long de la ligne pointillée sont fixes et ceux de la ligne continue ont un déplacement imposé dans la direction de la flèche

Des simulations numériques par éléments finis des essais de cisaillement ont été réalisées en utilisant le logiciel Abaqus et comparées avec les résultats expérimentaux présentés précédemment. Le modèle de McCormick a été mis en œuvre par le biais d'une sous-routine utilisateur Umat dans Abaqus. Le modèle EF comprend uniquement la zone utile de l'éprouvette de cisaillement, avec des éléments finis 3D hexaèdres à 8-nœuds et interpolation linéaire (C3D8R). Le maillage, présenté Fig.3, contient 10 éléments dans la largeur, 100 éléments dans la longueur et 1 élément dans l'épaisseur. Les nœuds situés le long d'un des mors sont fixés rigidement, tandis que ceux situés sur l'autre mors se déplacent dans la direction de cisaillement. Bien que la simulation numérique des instabilités plastiques soit sensible à l'influence du maillage [10], cet effet n'a pas été étudié ici en raison des temps de calcul élevés. Fig.4

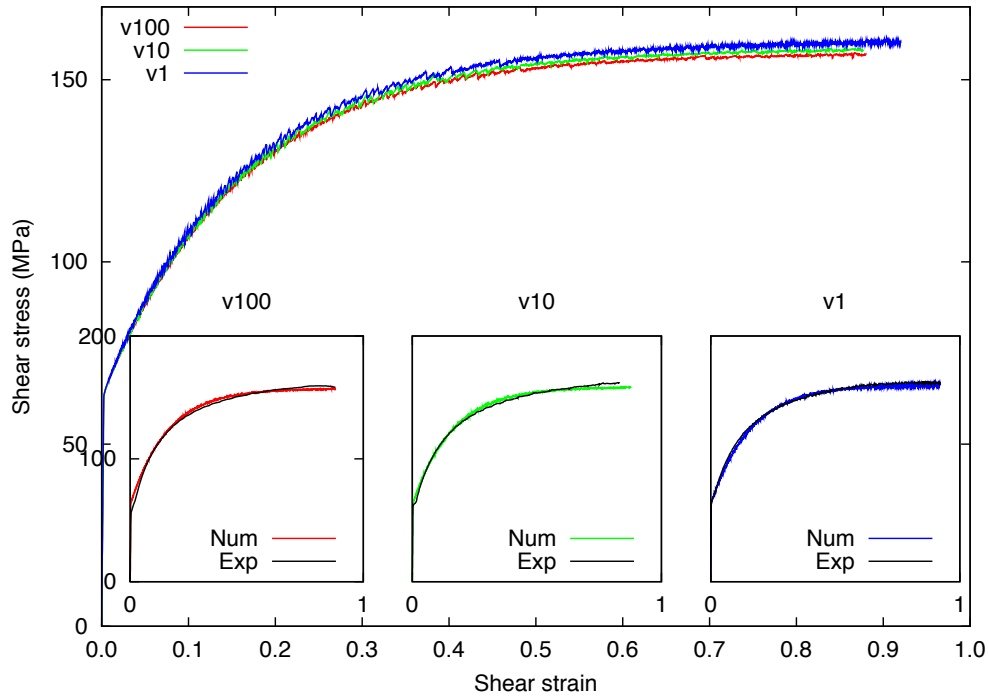


FIGURE 4 – Courbes contrainte-déformation en cisaillement avec le modèle de McCormick. Les inserts présentent la comparaison numérique/expérimental pour chaque vitesse de déformation

présente les courbes contrainte-déformation numériques obtenues pour les 3 vitesses de déformation étudiées. En insert, les résultats numériques sont comparés par rapport aux résultats expérimentaux et montrent une bonne adéquation pour l'ensemble de la gamme de vitesse de déformation étudiée. On observe qu'avec les paramètres identifiés, le modèle est capable de reproduire les oscillations sur les courbes, dont l'amplitude est de l'ordre de grandeur de celle des courbes expérimentales.

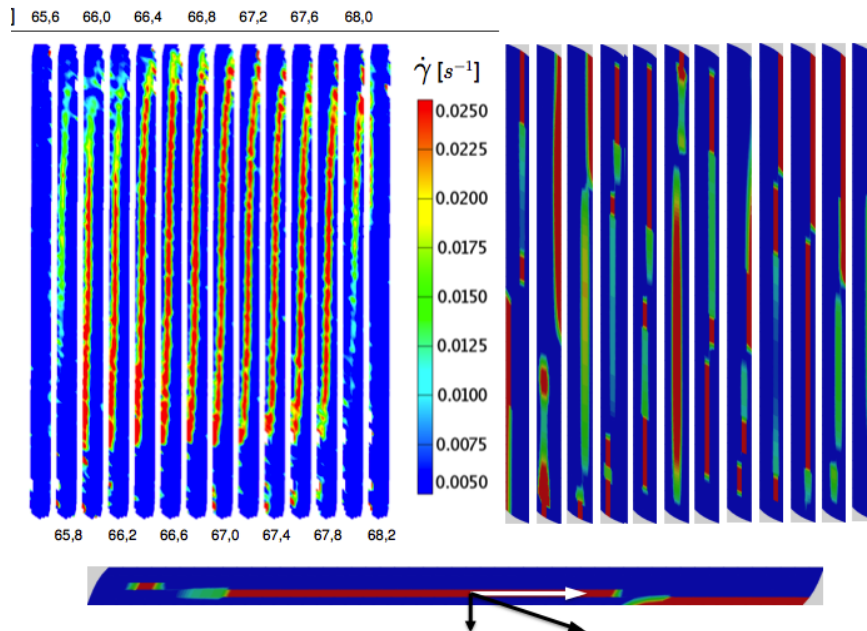


FIGURE 5 – Isovaleurs de vitesses de déformation locales pour v_{10} pour une déformation $0.67 < \gamma < 0.7$, expérimentales (images de gauche) et numériques (images de droite). L'échelle des isovaleurs est la même pour les deux groupes d'images et les flèches indiquent la cinématique des bandes

Enfin, Fig.5 présente une comparaison des champs de vitesses de déformation expérimentaux (à gauche) et numériques (à droite), obtenus au cours de l'essai v_{10} pour une valeur de γ comprise entre 0.67 et 0.7. On observe que la cinématique des bandes donnée par le modèle est en accord avec celle observée expérimentalement, bien que la vitesse de croissance des bandes numériques soit supérieure dans le sens de la contrainte de cisaillement, mais aussi dans le mouvement dans la direction perpendiculaire au cisaillement. De plus, la vitesse de déformation dans la bande est du même ordre de grandeur que celle mesurée, mais la zone de localisation de la déformation plastique, qui est fortement dépendante du maillage est plus marquée pour la simulation numérique.

4 Conclusions

Des observations originales de bandes PLC se produisant au cours d'essais de cisaillement à température ambiante sur un alliage d'aluminium AA5754-O ont été mises en évidence pour 3 vitesses de déformation différentes. On a montré que ces bandes de localisation plastique se produisent aussi pour ce type de trajet de déformation. Les courbes d'écoulement présentent un plateau pour la contrainte seuil ainsi que des oscillations qui sont dues à la manifestation de l'effet PLC. Le matériau présente dans ces conditions de vitesses de déformation et de température, une sensibilité négative à la vitesse de déformation. La cinématique des bandes est relativement similaire à celle observée en traction : l'apparition des bandes a lieu à proximité d'un mors, dans une zone de l'éprouvette en compression, se développent dans la direction de cisaillement maximum et traversent l'échantillon dans la direction duale. L'orientation des bandes varie au cours de la déformation plastique : pour les faibles déformations, elle sont parallèles à la direction de cisaillement. Lorsque la déformation augmente, l'orientation des bandes suit une diagonale joignant les deux zones en compression. Enfin, la simulation numérique des essais expérimentaux en utilisant le modèle de McCormick a montré que ce modèle est capable de reproduire les oscillations observées sur les courbes d'écoulement ainsi que la cinématique des bandes.

Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil Régional de Bretagne, la Portuguese Foundation for Science and Technology (PTDC/EME-TME/103350/2008) et le FEDER (FCOMP-01-0124-FEDER-010301).

Références

- [1] McCormick P.G. Theory of flow localisation due to dynamic strain ageing. *Acta Metallurgica*, **36** (1988) 3061-3067
- [2] Ait-Amokhtar H., Vacher P., Boudrahem S. Kinematics fields and spatial activity of Portevin-Le Chatelier bands using the digital image correlation method. *Acta Materialia*, **54** (2006) 4365-4371
- [3] Zhang S., McCormick P.G., Estrin Y. The morphology of Portevin-Le Chatelier bands : finite element simulation for Al-Mg-Si. *Acta Materialia*, **49** (2001) 1087-1094
- [4] Bohlke T., Bondar G., Estrin Y., Lebyodkin M. Geometrically non-linear modeling of the Portevin-Le Chatelier effect. *Computational Materials Science*, **44** (2009) 1076-1088
- [5] Lebyodkin M., Dunin-Barkowskii L., Brechet Y., Estrin Y., Kubin L. Spatio-temporal dynamics of the Portevin-Le Chatelier effect : experiment and modelling. *Acta Materialia*, **48** (2000) 2529-2541
- [6] Maziere M., Besson J., Forest S., Tanguy B., Chalons H., Vogel F. Numerical aspects in the finite element simulation of the Portevin-Le Chatelier effect. *Computational Methods in Applied Mechanics Engineering*, **199** (2010) 734-754
- [7] Coer J., Manach P.Y., Laurent H., Menezes L.F., Oliveira M.C. Piobert-Luders plateau and Portevin-Le Chatelier effect in an Al-Mg alloy in simple shear. *Mechanics Research Communications*, **48** (2013) 1-7
- [8] Thuillier S., Manach P.Y. Comparison of the work-hardening of metallic sheets using tensile and shear strain paths. *International Journal of Plasticity*, **25** (2009) 733-751
- [9] Ozturk F., Pekel H., Halkaci H.S. The Effect of Strain-Rate Sensitivity on Formability of AA 5754-O at Cold and Warm Temperatures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **20** (2011) 77-81
- [10] Marais A., Maziere M., Forest S., Parrot A., Le Delliou P. Identification of a strain-aging model accounting for Luders behavior in a C-Mn steel. *Philosophical Magazine*, **92** (2012) 3589-3617