

Caractérisation et simulation numérique des instabilités plastiques dans les alliages Al-Mg

Baptiste REYNE^{a,b,c}, Nicolas MOËS^a, Pierre-Yves MANACH^b

a. Gem : Institut de recherche en génie civil et mécanique – Centrale Nantes, UMR CNRS 6183

b. IRDL : Institut de recherche Dupuy de Lôme – Université Bretagne Sud, UMR CNRS 6027

c. baptiste.reyne@ec-nantes.fr

Résumé

Les instabilités plastiques désignent une vaste famille de non-linéarités matérielles auxquelles sont sujets de nombreux matériaux solides. Parmi elles, les bandes de Piobert-Lüders et l'effet Portevin-Le Chatelier sont rencontrés notamment dans plusieurs alliages d'aluminium-magnésium à température ambiante. Ces phénomènes sont tous deux caractérisés par une localisation répétée de la déformation qui prend la forme de fines bandes de localisation. Leur prédiction complexe empêche l'emploi de certains alliages d'aluminium dans l'industrie. Basés sur une campagne de caractérisation expérimentale, un modèle de comportement qui porte une description explicite des bandes de localisation est formulé.

Abstract

Plastic instabilities refer to a wide variety of material non-linearities that a lot of solids are subjected to. Among them, Piobert-Lüders bands and the Portevin-Le Chatelier effect are met at room temperature in several aluminium-magnesium alloys. Both of these phenomena are characterized by repeated localizations of strain in the form of thin bands. Their difficult prediction hinders the use of some aluminium alloys in the industrial context. Based on an experimental characterization campaign, a constitutive model that embeds an explicit description of localization bands is proposed.

Mots clefs : Portevin–Le Chatelier, instabilités plastiques, aluminium

1 Introduction

L'effet Portevin–Le Chatelier (PLC) [3, 5] se manifeste par de minces bandes de déformations qui apparaissent à la surface de certains alliages aluminium–magnésium sous sollicitations mécaniques. Elles apparaissent de façon répétée jusqu'à la rupture. Elle s'accompagnent de chutes de contraintes ; et leur cinétique macroscopique dépend principalement de la température, du niveau de déformation et de la vitesse de chargement [9]. La simulation de l'effet PLC pour des applications industrielles est basée sur des approches continues, et des équations locales qui reproduisent l'écroûissage oscillant associé aux

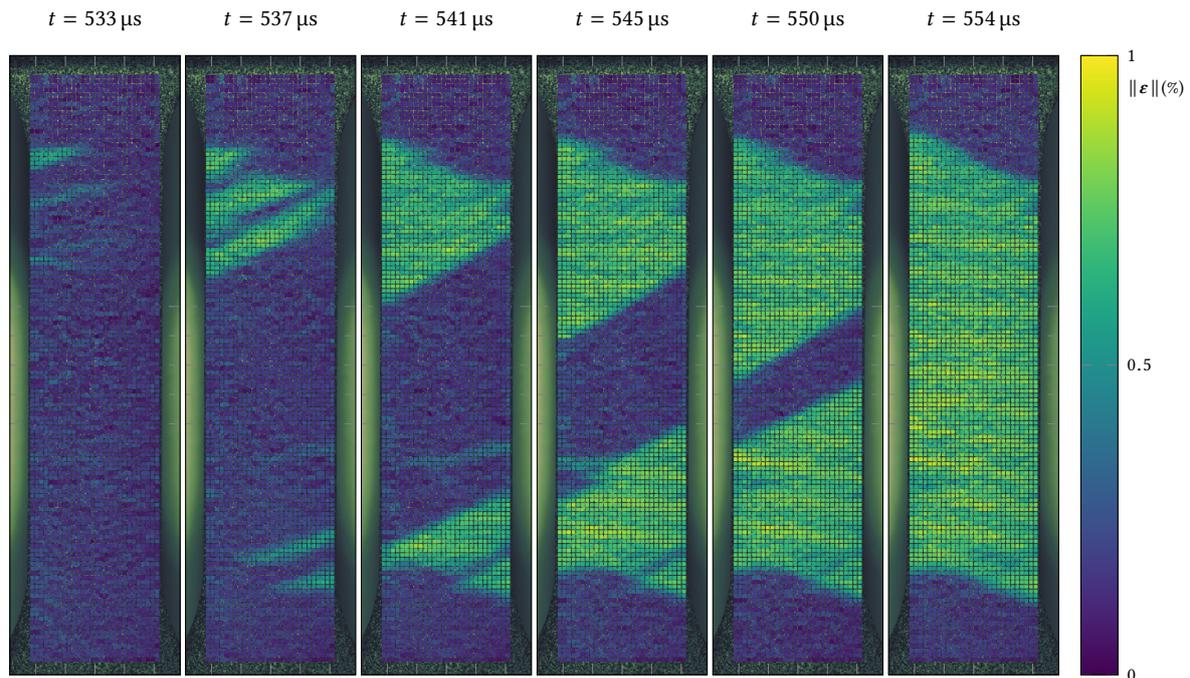


FIGURE 1 – États successifs de déformation dans le plan d’une éprouvette de traction. Mesures par corrélation d’image numérique. L’apparente propagation d’un front de déformation plastique correspond aux bandes de Piobert–Lüders observées à l’initiation de l’écoulement plastique.

bandes de déformations [1, 8]. Les modèles correspondant permettent de reproduire qualitativement des cinématiques localisantes, mais sont soumis à des difficultés numériques importantes [4]. En l’absence de prédiction quantitative à l’étape de conception, l’effet PLC est évité dans l’industrie par le recours à des matériaux et procédés différents et parfois plus coûteux. Il existe donc un besoin pour des approches permettant la prédiction précise pour un effort numérique raisonnable. Dans ce résumé étendu, on décrit une démarche qui répond à cette problématique. L’objectif à long terme est la construction d’un modèle et d’un schéma de résolution centrés sur la cinématique des bandes de localisations.

2 Caractérisation expérimentale

Des essais de traction sont menés sur le matériau AA5086-H111 en traction, à température ambiante et à des taux de déformation imposés compris entre 10^{-4} s^{-1} et 10^{-1} s^{-1} (données en libre accès [6]). Les résultats sont analysés dans [7] et concernent la cinétique des bandes de déformations (figure 1). On observe que l’incrément de déformation qu’elles transportent est liée à la contrainte par une relation de comportement sensible à la vitesse de chargement. Il est suggéré que, durant la nucléation des bandes, la contrainte et la déformation plastiques sont liées par un module tangent intrinsèque ; donc que les oscillations durant l’écrouissage ne sont pas des effets de structure. En somme, il peut être envisagé de considérer les bandes de déformations comme des objets mécaniques à part entière, qui répandent une déformation plastique tout en forçant la chute de contrainte. De plus, leur distribution spatiale – soit de proche en proche, soit désordonnée sur le domaine – peut être interprétée comme une conséquence de l’influence du gradient de la déformation plastique. Cette remarque résonne avec les modèles à gradients de variables internes qui présentent des tendances à la localisation [2].

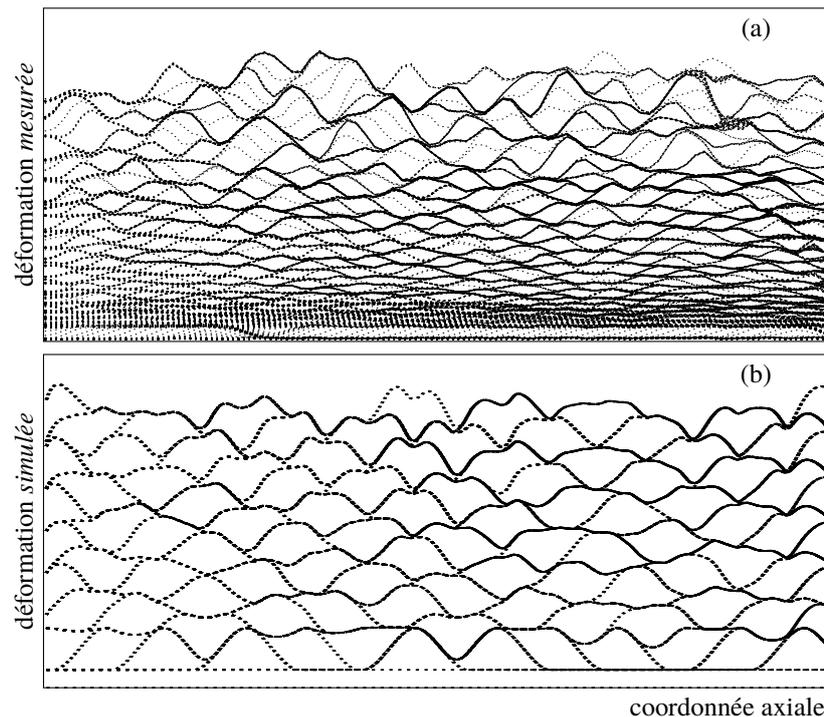


FIGURE 2 – États successifs de déformation dans l'axe d'une éprouvette de traction. Mesure par corrélation d'image (a) et simulation numérique (b).

3 Approche de modélisation

Le point de vue proposé consiste à superposer un comportement élastique linéaire et un modèle de nucléation de bandes de déformations. Leur centre est piloté par un formalisme en surface de charge ; leur épaisseur et leur distribution sont données dans une fonction de forme incluse dans le modèle. La vitesse de déformation plastique est ajustée de manière à satisfaire une condition sur la puissance plastique. Un exemple est présenté sur la figure 2 où sont représentés les états de déformations successifs sur l'axe d'une éprouvette de traction, à intervalle de temps réguliers. La mesure expérimentale (a) est comparée à une simulation numérique (b). L'hétérogénéité des déformations se traduit par une progression saccadée et non-uniforme de la déformation plastique, par « bosses » successives. Dans la prédiction, on impose la hauteur de ces à-coups et leur apparition là où le niveau de plasticité est le plus faible. On retrouve la tendance cinématique globale des bandes de localisation.

4 Conclusion

Un point de vue sur la modélisation des instabilités plastiques est présenté avec une comparaison qualitative de résultats unidimensionnels. L'approche se concentre sur la cinématique des bandes de déformations qui peut être pilotée de façon explicite. Elle vient donc en complément des modèles de comportement standards où la localisation de la déformation émerge d'interactions locales. Le déploiement en dimensions supérieures pose des problèmes liés à la compatibilité cinématique des champs et à l'orientation des bandes de déformation. La simplicité de l'implémentation et la cohérence avec l'expérience demeurent encourageantes pour la suite des développements.

Références

- [1] Ahmed Benallal, Torodd Berstad, Tore Børvik, Odd Sture Hopperstad, I. Koutiri, and R. Nogueira De Codes. An experimental and numerical investigation of the behaviour of AA5083 aluminium alloy in presence of the Portevin-Le Chatelier effect. *International Journal of Plasticity*, 24(10) :1916–1945, October 2008.
- [2] Milan Jirásek and Simon Rolshoven. Localization properties of strain-softening gradient plasticity models. Part II : theories with gradients of internal variables. *International Journal of Solids and Structures*, 46(11-12) :2239–2254, June 2009.
- [3] Antoine Philibert Masson. Sur l'élasticité des corps solides. *Annales de Chimie et de Physique (troisième série)*, 3 :451–462, 1841.
- [4] Matthieu Mazière, Jacques Besson, Samuel Forest, Benoit Tanguy, Hervé Chalons, and François Vogel. Numerical aspects in the finite element simulation of the Portevin-Le Chatelier effect. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 199(9) :734–754, January 2010.
- [5] Albert Portevin and François Le Chatelier. Sur un phénomène observé lors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation, 1923.
- [6] Baptiste Reyne and Pierre-Yves Manach. AA5086 tensile tests with portevin-le chatelier (plc) effect, complete raw dataset : Dic images, raw output and elements of post-processing, July 2018.
- [7] Baptiste Reyne, Pierre-Yves Manach, and Nicolas Moës. Macroscopic consequences of Piobert–Lüders and Portevin–Le Chatelier bands during tensile deformation in Al-Mg alloys. *Materials Science and Engineering : A*, 2019.
- [8] Egidio Rizzi and Peter Hähner. On the Portevin-Le Chatelier effect : theoretical modeling and numerical results. *International Journal of Plasticity*, 20(1) :121–165, January 2004.
- [9] Ahmet Yilmaz. The Portevin-Le Chatelier effect : a review of experimental findings. *Science and Technology of Advanced Materials*, 12(6) :063001, December 2011.