



HAL
open science

Influence des effets d'histoire de vitesse de déformation lors du développement d'instabilités de striction

Nicolas Jacques, José Rodriguez-Martinez

► To cite this version:

Nicolas Jacques, José Rodriguez-Martinez. Influence des effets d'histoire de vitesse de déformation lors du développement d'instabilités de striction. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280179

HAL Id: hal-04280179

<https://hal.science/hal-04280179>

Submitted on 10 Nov 2023

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.

Influence des effets d’histoire de vitesse de déformation lors du développement d’instabilités de striction

N. JACQUES^a, J.A. RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ^b

a. ENSTA Bretagne, UMR CNRS 6027, IRDL, 2 rue François Verny, F-29806 Brest cedex 9, France, e-mail : nicolas.jacques@ensta-bretagne.fr

b. Department of Continuum Mechanics and Structural Analysis. University Carlos III of Madrid. Avda. de la Universidad, 30. 28911 Leganés, Madrid, Spain, e-mail : jarmarti@ing.uc3m.es

Résumé :

Dans cette communication, nous analysons l’influence des effets d’histoire de vitesse de déformation sur le développement d’instabilités de striction. Pour un matériau présentant des effets d’histoire de vitesse de déformation, il est nécessaire de distinguer deux types de sensibilités à la vitesse de déformation : la sensibilité instantanée (liée à la viscosité intrinsèque du matériau) et la sensibilité microstructurale (liée au fait que l’évolution de la microstructure du matériau et donc son écrouissage sont dépendants de la vitesse de déformation). Les résultats obtenus montrent que les effets d’histoire de vitesse de déformation jouent un rôle important lors du développement de la striction. En effet, seule la sensibilité instantanée semble contribuer à ralentir la croissance de l’instabilité.

Abstract :

The present paper is devoted to the analysis of strain-rate history effects on neck formation under dynamic loading. For materials exhibiting strain-rate history effects, two different strain-rate sensitivities should be distinguished: the instantaneous strain-rate sensitivity and the work-hardening strain-rate sensitivity. The obtained results show that strain-rate history effects have a significant influence on the onset and development of necking. Indeed, contrary to the instantaneous strain-rate sensitivity, the work-hardening strain-rate sensitivity does not contribute to delay the neck formation.

Mots clefs : striction, viscoplasticité, effets d’histoire de vitesse de déformation, sollicitations dynamiques

1 Introduction

La rupture de matériaux ductiles sollicités en traction est souvent précédée par le développement d’instabilités de déformation plastique telle que la striction. Ce phénomène est étudié depuis de nombreuses années. Il est par exemple bien connu que la sensibilité à la vitesse de déformation de la

réponse du matériau tend à ralentir le développement de la striction [1-2]. Sous sollicitations dynamiques, l'inertie peut aussi avoir un effet stabilisant, permettant d'atteindre de plus grandes déformations avant la survenue de la striction localisée [3-5]. Concernant l'influence de la sensibilité à la vitesse de déformation, les efforts de modélisation proposés dans la littérature considèrent généralement des modèles de comportement viscoplastiques « standards », dans lesquels la valeur de la contrainte d'écoulement du matériau est supposée dépendre des valeurs courantes de la déformation plastique équivalente et de la vitesse de déformation plastique équivalente. Ce type de modèle de comportement va décrire une sensibilité à la vitesse de déformation que l'on peut qualifier d'instantanée. Or, plusieurs travaux de la littérature ont montré que la réponse mécanique de nombreux matériaux, en particulier les métaux ayant une structure cristalline cubique à faces centrées ou hexagonale compact, présente des effets d'histoire de vitesse de déformation [6-9]. Cela signifie que la contrainte d'écoulement à un instant donné ne dépend pas uniquement de la valeur courante de la vitesse de déformation, mais aussi de son évolution précédente. Pour un matériau présentant des effets d'histoire de vitesse de déformation, il est nécessaire de distinguer deux types de sensibilités à la vitesse de déformation : la sensibilité instantanée (liée à la viscosité intrinsèque du matériau) et la sensibilité microstructurale (liée au fait que l'évolution de la microstructure du matériau et donc son écrouissage sont dépendants de la vitesse de déformation).

Dans cette communication, nous proposons d'analyser l'influence des effets d'histoire de vitesse de déformation sur le développement d'instabilités de striction. Pour cela, nous avons réalisé des simulations numériques par éléments finis pour deux configurations différentes : une barre sollicitée en traction et un anneau en expansion rapide. Pour le cas de l'anneau, un modèle analytique basé sur une analyse de stabilité linéaire a aussi été développé. Ces différentes analyses reposent sur l'utilisation d'un modèle de comportement viscoplastique permettant de contrôler les influences relatives de la sensibilité instantanée et de la sensibilité microstructurale. Les résultats obtenus montrent que les effets d'histoire de vitesse de déformation jouent un rôle important lors du développement de la striction. En effet, seule la sensibilité instantanée semble contribuer à ralentir la croissance de l'instabilité [10].

2 Un modèle de comportement viscoplastique avec effets d'histoire de vitesse de déformation

Dans le paragraphe, nous présentons un modèle de comportement viscoplastique avec effets d'histoire de vitesse de déformation. Ce modèle est basé sur l'utilisation du critère de von Mises et considère un écrouissage isotrope. La contrainte d'écoulement du matériau est donnée par la relation suivante :

$$\bar{\sigma}(H, \dot{\bar{\epsilon}}) = \sigma_0 + H \cdot \left(1 + (1 - \alpha) \cdot z(\dot{\bar{\epsilon}})\right) \cdot \omega(\dot{\bar{\epsilon}}) \quad (1)$$

$$\text{avec } z(\dot{\bar{\epsilon}}) = K \cdot \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_R}\right)^m \text{ et } \omega(\dot{\bar{\epsilon}}) = \sqrt{\frac{1+z(\dot{\bar{\epsilon}})}{1+z(\dot{\bar{\epsilon}})+\alpha(1-\alpha)z(\dot{\bar{\epsilon}})^2}}$$

Dans cette équation, σ_0 , K , m , $\dot{\bar{\epsilon}}_R$ et α sont des paramètres matériaux. $\dot{\bar{\epsilon}}$ est la vitesse de déformation plastique équivalente et H la variable interne décrivant l'écrouissage. Son évolution au cours de la déformation du matériau dépend de la vitesse de déformation plastique et est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial H}{\partial \bar{\epsilon}} = \sigma_R \cdot n \cdot (\bar{\epsilon})^{n-1} \cdot \left(1 + \alpha \cdot z(\dot{\bar{\epsilon}})\right) \cdot \omega(\dot{\bar{\epsilon}}) \quad (2)$$

où $\bar{\epsilon}$ est la déformation plastique équivalente, et σ_R et n deux paramètres matériaux. Le paramètre α (présent dans les Eqs. (1) et (2)) contrôle l'importance relative de la sensibilité à la vitesse de

déformation instantanée et de la sensibilité microstructurale, et donc les effets d'histoire de vitesse de déformation. Pour $\alpha = 0$, le modèle présente uniquement une sensibilité instantanée (donc pas d'effet d'histoire de vitesse de déformation) et pour $\alpha = 1$, uniquement une sensibilité microstructurale. Des valeurs intermédiaires correspondent à une combinaison de sensibilité instantanée et microstructurale. Il est important de noter que la valeur de α n'affecte pas la réponse du matériau lorsque la vitesse de déformation est constante. Cela signifie que α influe sur la nature de la sensibilité à la vitesse de déformation du matériau (importance relative de la sensibilité instantanée et microstructurale), mais pas sur sa sensibilité globale, observée à vitesse de déformation constante, qui est contrôlée par la fonction $z(\dot{\bar{\epsilon}})$. Pour illustrer l'influence du paramètre α , la figure 1 présente la réponse du modèle lors d'un saut de vitesse de déformation plastique.

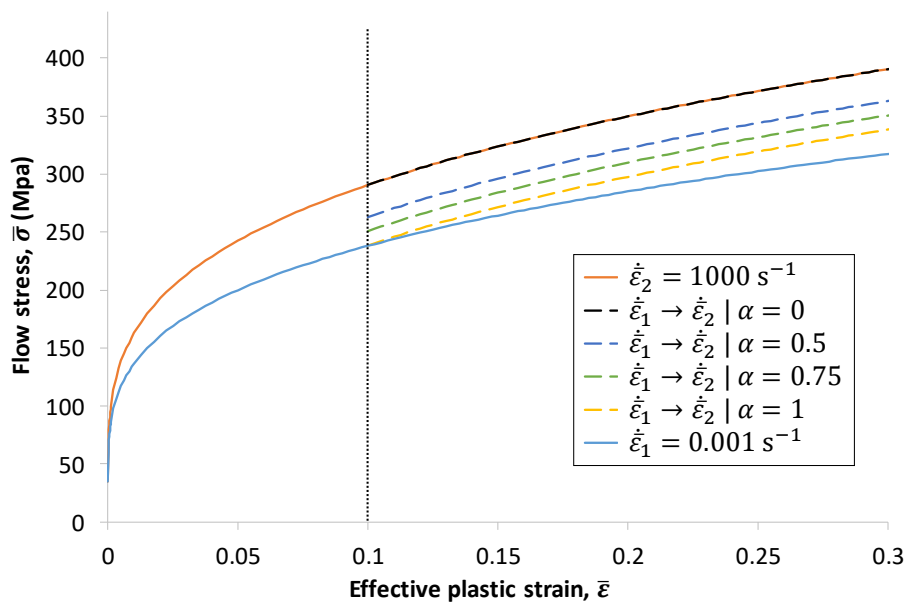


Fig. 1. Réponses du modèle de comportement lors d'un saut de vitesse de déformation plastique (de $\dot{\bar{\epsilon}}_1$ à $\dot{\bar{\epsilon}}_2$) pour différentes valeurs du paramètre α . Les courbes obtenues pour des vitesses de déformation plastiques constantes, $\dot{\bar{\epsilon}}_1$ et $\dot{\bar{\epsilon}}_2$, sont aussi présentées.

2 Résultats

Dans ce paragraphe, quelques résultats illustrant le rôle des effets d'histoire de vitesse de déformation sont présentés pour le cas d'une éprouvette sollicitée en traction dynamique. L'éprouvette est initialement au repos et soumise à un échelon de vitesse sur sa surface supérieure ; la surface inférieure est encadrée. Les paramètres matériaux correspondent à du cuivre. La présentation détaillée de ce cas d'étude et du modèle numérique utilisé est disponible dans [10].

La figure 2 montre, pour une vitesse appliquée de 20 m/s et différentes valeurs du paramètre α qui contrôle les effets d'histoire de vitesse de déformation, la géométrie de l'éprouvette et la distribution de déformation plastique équivalente lorsque la valeur maximale de la déformation plastique équivalente atteint 1,5 (valeur proche de la déformation à rupture d'un cuivre en traction uniaxiale [11]). Notons que lorsque cette valeur de 1,5 est atteinte, la striction est localisée (la déformation plastique se concentre dans la zone de striction). Nous pouvons observer que l'allongement de l'éprouvette au moment où la striction est localisée est dépendante de la valeur de α considérée. L'allongement le plus important est

obtenu pour $\alpha = 0$, c'est-à-dire dans le cas où le matériau présente uniquement une sensibilité instantanée. L'allongement à striction décroît progressivement lorsque la valeur de α augmente, correspondant à un rôle plus marqué de la sensibilité microstructurale et un matériau ayant plus d'effets d'histoire de vitesse de déformation.

La figure 3 montre l'évolution de la déformation plastique au centre de la zone de striction pour les différentes valeurs du paramètre α . Nous avons aussi représenté la « solution homogène », c'est-à-dire l'évolution théorique de la déformation en supposant celle-ci homogène dans la section utile de l'éprouvette, ainsi que la déformation plastique pour laquelle le critère de Considère est atteint (le critère de Considère caractérise l'initiation de la striction dans le cas d'un matériau non-sensible à la vitesse de déformation). La figure 3 montre également le résultat d'une simulation pour un matériau non-sensible à la vitesse de déformation ($K = 0$ dans l'équation (1)). Comme nous le voyons, les résultats de toutes les simulations sont proches de la solution homogène pour des niveaux de déformation inférieurs à la déformation de Considère. Lorsque celle-ci est atteinte, la courbe pour le matériau insensible à la vitesse de déformation s'écarte rapidement de la solution homogène, correspondant au développement de la striction. Lorsque le matériau est sensible à la vitesse de déformation, il se déforme plus de manière homogène avant la survenue de la striction. Cependant, les résultats sont fortement dépendants de la valeur de α , c'est-à-dire de l'influence des effets d'histoire de vitesse de déformation sur la réponse du matériau. La plus grande déformation avant striction est obtenue pour le cas où le matériau présente uniquement une sensibilité instantanée à la vitesse de déformation ($\alpha = 0$). Par contre, pour $\alpha = 1$, c'est-à-dire un matériau présentant uniquement une sensibilité microstructurale, la courbe obtenue est très proche de celle du matériau sans sensibilité à la vitesse ; la striction se développe rapidement lorsque la déformation de Considère est dépassée.

3 Conclusion

Les résultats présentés montrent qu'uniquement la sensibilité instantanée à la vitesse de déformation a un effet stabilisant, retardant le développement de la striction. Ainsi, tenir compte des effets d'histoire de vitesse de déformation, c'est-à-dire distinguer la sensibilité instantanée et microstructurale du matériau, semble important pour la description des phénomènes d'instabilité de déformation plastique. Des résultats pour un autre cas d'étude (anneau en expansion dynamique), confirmant ce résultat, sont disponible dans [10].

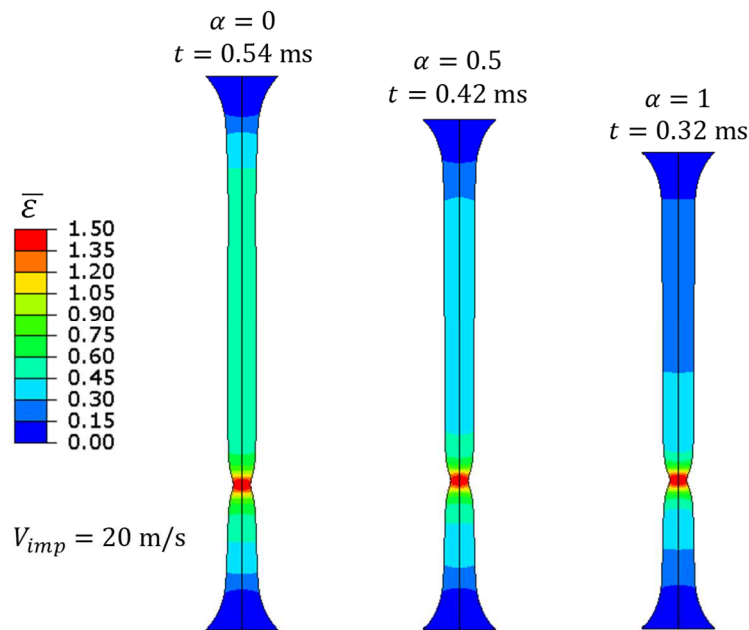


Fig. 2. Géométrie déformée et distribution de déformation plastique dans une éprouvette sollicitée en traction dynamique pour différentes valeurs du paramètre α contrôlant les effets d'histoire de vitesse de déformation. Les résultats correspondent à l'instant où la déformation plastique équivalente atteint 1.5 au centre de la zone de striction (les temps correspondant sont indiqués sur la figure). La vitesse appliquée au niveau de la surface supérieure de l'éprouvette est de 20 m/s. Les autres paramètres de simulation sont donnés dans [10].

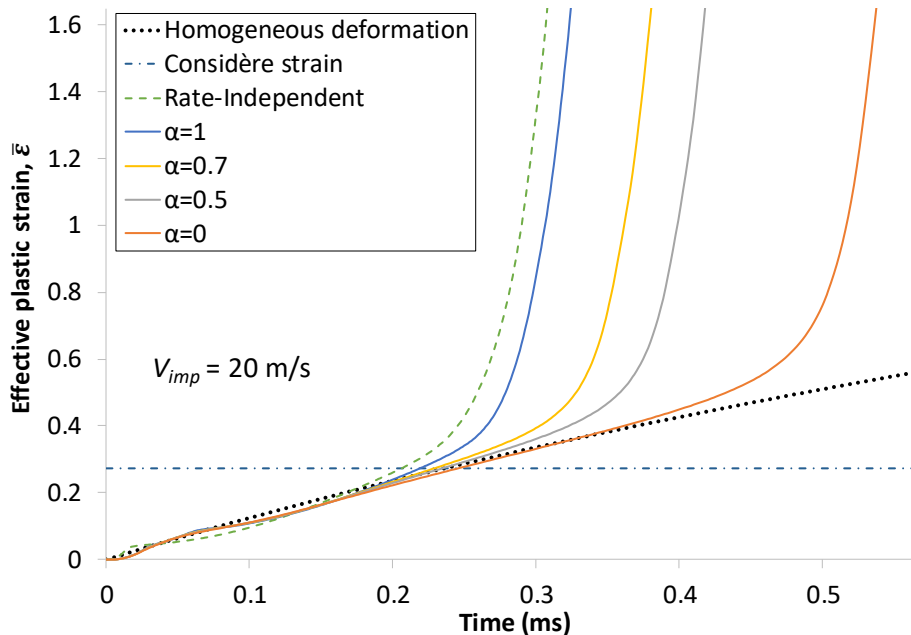


Fig. 3. Evolution de la déformation plastique équivalente au centre de la zone de striction (voir Fig. 2) dans une éprouvette sollicitée en traction dynamique pour différentes valeurs du paramètre α contrôlant les effets d'histoire de vitesse de déformation. Les résultats obtenus pour un matériau sans sensibilité à la vitesse de déformation ($K = 0$, voir Eq. (1)), ainsi que l'évolution de la déformation en supposant celle-ci homogène dans la section utile de l'éprouvette, sont aussi présentés. Nous avons indiqué également la déformation pour laquelle le critère de Considère est atteint.

Références

- [1] Marciniak Z., Kuczyński K., Pokora T., 1973. Influence of the plastic properties of a material on the forming limit diagram for sheet metal in tension. *International Journal of Mechanical Sciences*, 15(10), 789-800.
- [2] Ghosh A.K., 1977. Tensile instability and necking in materials with strain hardening and strain-rate hardening. *Acta Metallurgica*, 25(12), 1413-1424.
- [3] Fressengeas C., Molinari A., 1985. Inertia and thermal effects on the localization of plastic flow. *Acta Metallurgica*, 33(3), 387-396.
- [4] Altynova M., Hu X., Daehn G.S., 1996. Increased ductility in high velocity electromagnetic ring expansion. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27(7), 1837-1844.
- [5] Jacques N., 2020. An analytical model for necking strains in stretched plates under dynamic biaxial loading. *International Journal of Solids and Structures*, 200-201, 198-212.
- [6] Nicholas T., 1971. Strain-rate and strain-rate-history effects in several metals in torsion. *Experimental Mechanics*, 11(5), 370-374.
- [7] Klepaczko J., 1975. Thermally activated flow and strain rate history effects for some polycrystalline FCC metals. *Materials Science and Engineering*, 18(1), 121-135.
- [8] Senseny P.E., Duffy J., Hawley R.H., 1978. Experiments on strain rate history and temperature effects during the plastic deformation of close-packed metals. *Journal of Applied Mechanics*, 45(1), 60-66.
- [9] Lea L.J., 2018. Structural evolution in the dynamic plasticity of FCC metals. Doctoral dissertation, University of Cambridge. <https://doi.org/10.17863/CAM.20971>
- [10] Jacques N., Rodríguez-Martínez J.A., 2021. Influence on strain-rate history effects on the development of necking instabilities under dynamic loading conditions. *International Journal of Solids and Structures*, 230, 111152.
- [11] French I.E., Weinrich P.F., 1975. The influence of hydrostatic pressure on the tensile deformation and fracture of copper. *Metallurgical Transactions A*, 6(4), 785.