

Simulations numériques d'essais de cisaillement simple

Paulo Flores, Pierre de Montleau, Vincent Mathonet & Anne Marie Habraken

Département de Mécanique des matériaux et Structures M&S
Université de Liège
Chemin des Chevreuils 1, 4000 Liège, Belgique
Paulo.Flores@ulg.ac.be

Résumé :

Diverses expériences existent pour identifier la surface de plasticité initiale et les lois d'écrouissage. Se basant sur les travaux de Piljman(2001), le laboratoire M&S a entrepris la construction d'une machine d'essai bi-axiale, capable d'exécuter des essais d'état plan de déformation, de cisaillement (monotone ou cyclique) ou la combinaison simultanée des deux. Cet article présente les simulations de l'expérience pour un cas de cisaillement simple cyclique avec trois type d'écrouissage.

Abstract :

Several tests have been designed in order to identify the initial yield locus and the parameters required in hardening laws. Taking into account the work done by Piljman (2001), M&S laboratory has started the construction of a bi-axial machine able to perform plane strain test, shear test (monotonic or cyclic), and a simultaneous combination of both. This article presents the simulations of a cyclic simple shear test using three types of hardening.

Mots-clefs : cisaillement simple ; écrouissage ; tôle

1 Introduction

La caractérisation des matériaux a pris une part importante dans la modélisation du processus de déformation suite aux modèles complexes utilisés de manière à prédire la géométrie finale. La modélisation du retour élastique, des rides d'instabilité ou de la formation d'oreilles causées par l'anisotropie des métaux, tels que les alliages d'aluminium ou les aciers à haute résistance utilisés en technologie aérospatiale ou dans l'industrie automobile dépend fortement de la loi constitutive utilisée dans le code d'éléments finis.

De multiples essais sont proposés pour décrire la surface de plasticité initiale et trouver les paramètres requis par les lois d'écrouissage (G' Sell et al (1983), Rauch (1998), Kuwabara *et al* (1998)). Se basant sur le modèle de la machine développée à l'Université de Twente (Piljman(2001)), le laboratoire de mécanique des solides de l'Université de Liège a entrepris la construction d'une machine d'essai bi-axiale. Celle-ci est capable de solliciter les éprouvettes en état plan de déformation, en cisaillement (simple ou cyclique) ou d'imposer une combinaison simultanée des deux.

Une simulation par éléments finis de l'éprouvette sollicitée par un cisaillement cyclique a été réalisée pour trois lois constitutives. Chacune est basée sur la surface de plasticité de Hill (1950). Elles se différencient par le choix des paramètres de la loi d'écrouissage, obtenant de cette façon un écrouissage isotrope pur, cinématique pur et mixte. Le modèle d'écrouissage utilisé ici est basée sur celui proposé par Teodosiu et Hu (1995).

Les objectifs des simulations sont de comparer les lois d'écrouissage sous des charges cycliques, de vérifier la possibilité d'identifier les paramètres les plus sensibles des lois

d'écroissage par ce type d'essai, finalement de définir une zone où le matériau est soumis à une sollicitation homogène.

Le paragraphe 2 présente les lois constitutives utilisées suivi au point 3 d'une brève description de la machine bi-axiale, de la géométrie de l'éprouvette ainsi que sa discrétisation par éléments finis. Enfin, les résultats prendront place dans le paragraphe 4 alors que les conclusions achèveront ce travail dans le paragraphe 5.

2 Modélisation des lois constitutives

2.1 La loi d'écroissage de Teodosiu et Hu

Cette loi, Teodosiu et Hu (1995), tient compte de l'évolution des dislocations substructurales lors des déformations inverses, ceci permet d'expliquer la stagnation de l'écroissage pour des déformations importantes ainsi que l'influence de l'augmentation de la précontrainte. Cela autorise donc la modélisation de l'effet Bauschinger et les effets des changements de direction du chemin de déformation tels ceux observés durant des modes de chargement complexes. Le set complet de variables internes est représenté par $(\underline{S}, \underline{P}, \underline{\alpha}, R)$. \underline{S} , $\underline{\alpha}$ et R ont la même dimension que la contrainte et \underline{P} est sans dimension. Pour les matériaux recuits, ces paramètres sont initialisés à zéro. \underline{S} (tenseur du quatrième ordre) décrit la nature directionnelle de la structure intragranulaire. \underline{P} (tenseur du second ordre) indique les changements de chemin de déformation, celui-ci est associé à la polarité des dislocations persistantes de la structure et sature dans la direction du tenseur du taux de déformation $\underline{N}_{\dot{\epsilon}_p}$. $\underline{\alpha}$ décrit la position du centre de la surface (back stress) et R prend en compte l'écroissage isotrope par les dislocations accumulées. Si \underline{S} est décomposé comme montré dans l'équation (1) (où \otimes est le produit croisé), l'évolution des ces variables d'état est représentée par les équations (2) à (6) où par ∇ est le taux objectif de Jaumann, $\dot{\bar{\epsilon}}^p$ est le taux de déformation plastique équivalent.

$$\underline{S} = S_D \underline{N}_{\dot{\epsilon}_p} \otimes \underline{N}_{\dot{\epsilon}_p} + \underline{S}_L \quad (1) \quad \nabla \underline{P} = C_P (\underline{N}_{\dot{\epsilon}_p} - \underline{P}) \dot{\bar{\epsilon}}^p \quad (4)$$

$$\dot{S}_D = C_{SD} [g(S_{sat} - S_D) - h S_D] \dot{\bar{\epsilon}}^p \quad (2) \quad \nabla \underline{\alpha} = C_\alpha (\alpha_{sat} \underline{N}_{\dot{\epsilon}_p} - \underline{\alpha}) \dot{\bar{\epsilon}}^p \quad (5)$$

$$\nabla \underline{S}_L = -C_{SL} \left(\frac{S_L}{S_{sat}} \right)^{n_L} \underline{S}_L \dot{\bar{\epsilon}}^p \quad (3) \quad \dot{R} = C_R (R_{sat} - R) \dot{\bar{\epsilon}}^p \quad (6)$$

τ_0 , α_0 , S_{sat} , R_{sat} , C_P , C_{SL} , C_{SD} , C_x , C_R , n_p , n_L , m , q sont les paramètres du matériau.

La taille de la surface de plasticité $\bar{\sigma}$ est finalement défini par:

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + m \|\underline{S}\| + R. \quad (7)$$

2.2 Descriptions des lois choisies

Afin de distinguer simplement l'écroissage isotrope et cinématique, l'influence de l'évolution de la matrice de dislocations structurales \underline{S} est éliminé en initialisant les paramètres

$C_{SD}=C_{SL}=0$. On peut alors montrer que ce modèle est équivalent au modèle phénoménologique de Armstrong Frederick (Bari *et al* (2000)). Des paramètres décrivant un acier fictif sont adoptés, $C_{\alpha}=10$, $\alpha_{sat}=100$ MPa et $C_R=10$, $R_{sat}=200$ MPa, ils représentent un comportement plausible avec écrouissage mixte. Les autres paramètres sont $m=1$ et $\sigma_0=126$ MPa. On suppose que le comportement élastique du matériau est isotrope : $E=209880$ MPa, $\nu=0.28$. Pour les paramètres anisotropes de Hill, on utilise $F=0.380365$, $G=0.413445$, $H=0.586555$ et $N=L=M=1.414855$.

Pour l'essai de cisaillement simple cyclique modélisé, le chargement est divisé en trois phases: phase 1 chargement monotonique, phase 2, chargement inverse et phase 3 retour à la fin de la phase 1. Dans un premier temps, la simulation de l'essai cyclique est réalisée pour un seul élément (voir Figure 1). Les paramètres d'écrouissage ont été choisis de telle sorte que la saturation n'est pas atteinte à la fin du chargement monotonique (10% de déformation). Les paramètres des modèles d'écrouissage isotrope pur et d'écrouissage cinématique pur ont été ajustés de façon à reproduire la charge monotonique obtenue pour un écrouissage mixte, voir de Montleau *et al* (2003).

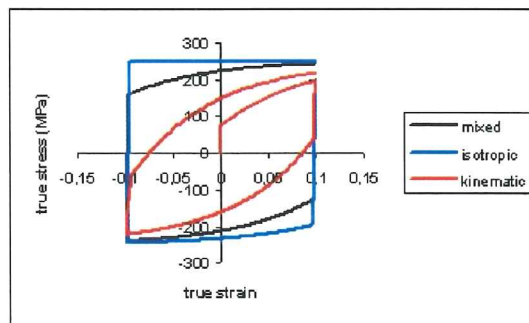


Fig. 1 – Essai cyclique sur un élément.

3 Application

Un test de cisaillement simple cyclique tel qu'il sera réalisé expérimentalement est simulé par éléments finis.

3.1 La machine d'essai bi-axiale

Une machine d'essai bi-axiale, capable de combiner le cisaillement avec un état plan de déformation, est construite de manière à déterminer les paramètres d'écrouissage d'un métal. Le principal avantage de ce dispositif d'expérimentation est qu'il est possible de tester le comportement d'une éprouvette sous des charges multi-axiales et non proportionnelles. Il est alors possible d'observer les effets de changement de chemins de déformation sans devoir démonter l'éprouvette.

Le schéma de cette machine d'essai est présentée à la Figure 2 et son état d'avancement est exposé à la Figure 3. Les flèches indiquent les directions des déplacements engendrés par les vérins. Le mouvement horizontal provoque une déformation de cisaillement tandis que le vertical entraîne l'état plan de déformation. L'idée originale de ce montage provient de Piljman (2001).

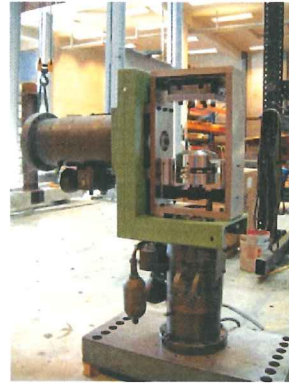
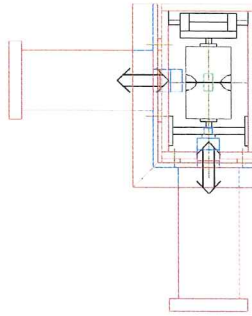


Fig. 2 – Directions de mouvement des vérins. Fig. 3 – Etat d'avancement de la machine.

3.2 Géométrie de l'éprouvette

L'éprouvette utilisée sur cette machine est représentée à la Figure 4, Piljman (2001). Elle est adaptée aux essais en état plan de déformation et de cisaillement (simple ou cyclique), séparés ou simultanés. Les avantages de la forme de l'éprouvette sont mis en évidence lors des tests de cisaillement. Elle permet d'obtenir une grande zone de déformation homogène, elle limite la localisation des déformations, elle est facile à usiner et finalement elle donne la possibilité d'inverser la direction de chargement en cours d'expérimentation, G' Sell *et al* (1983) et Hu (1992). La pièce est dimensionnée de manière à obtenir des distributions de contraintes de cisaillement quasi homogènes dans la zone centrale de mesure. Ce dimensionnement permet aussi de minimiser les perturbations de contraintes causées par la force exercée par les mors et de limiter le voilement, Hu (1992)

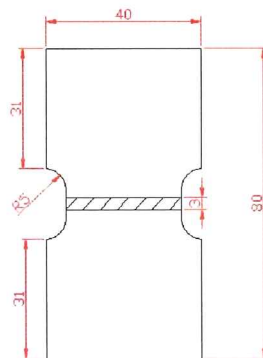


Fig. 4 – Eprouvette pour la machine bi-axiale (mm).
La zone hachurée représente la zone de mesure.

3.3 Discrétisation en éléments finis

La zone hachurée sur la Figure 4 est modélisée par le code d'éléments finis Lagamine. Pour des raisons de symétrie, la simulation est réalisée uniquement sur la moitié de l'épaisseur de l'éprouvette, soit 0.5 mm.

Pour cette simulation tridimensionnelle, un élément de type mixte avec 8 nœuds et un point d'intégration (Zhu et Cescotto (1994)) a été choisi. Cet élément est basé sur le principe de Hu-Washizu et est formulé en trois champs : déplacement, déformation et contrainte. Le choix d'une simulation tridimensionnelle s'explique par le but final de tester de nombreuses lois tridimensionnelles basées sur la texture, Duchêne *et al* (2002). Le maillage choisi est non

structuré pour limiter l'apparition des déformations localisées pour un matériau adoucissant, ce qui n'est pas le cas pour le matériau virtuel utilisé à ce niveau.

4 Résultats

Comme expliqué au paragraphe 2.2, le déplacement a été imposé en trois phases. Dans ce cas-ci, l'amplitude du déplacement a atteint 1mm. La simulation a été exécutée pour les trois variantes d'écroutissage.

La Figure 5 montre les contraintes σ_{xy} de la zone étudiée de l'éprouvette à la fin du cycle.

La Figure 6 montre les résultats des contraintes de Cauchy dans les axes globaux (X longueur, Y hauteur de l'échantillon initial) par rapport à la déformation logarithmique pour un point situé au cœur de la zone de déformation homogène.

La Figure 7 représente la force par rapport au déplacement.



Fig. 5 – Courbes de niveau de σ_{xy} (MPa) dans l'éprouvette déformée à la fin du cycle.

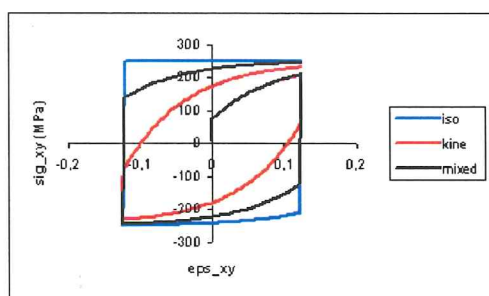


Fig. 6 – Contrainte réelle/déformation réelle.

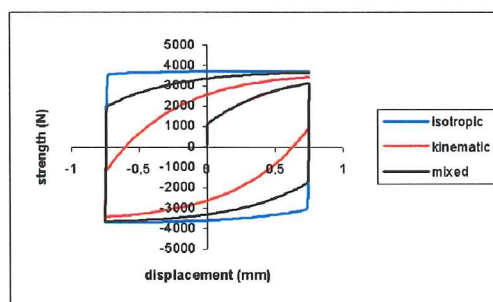


Fig. 7 – Force/déplacement.

5 Conclusions

A partir de la première simulation faite sur un élément, on peut constater les différences qui existent entre les trois lois d'écroutissages même si elles fournissent des résultats identiques pour un premier chargement monotone. La simulation du test réel confirme que l'expérience mettra bien en évidence ces différences, le montage expérimental prévu permettra donc d'identifier correctement le modèle d'écroutissage le mieux adapté au matériau. L'étape présentée ci-dessus est une phase préliminaire de la recherche qui vise à comparer des modèles plus sophistiqués : lois de comportement anisotrope micro-macro basées sur la texture (Duchêne *et al* (2002)) et couplées avec divers modèles d'écroutissage.

La capacité du montage expérimental d'appliquer à la fois un état de cisaillement et de traction permettra également d'identifier la forme initiale de la surface de plasticité. Ce point est important pour choisir le modèle le plus adapté : Hill, Barlat, modèles micro-macro. La petite taille des échantillons facilite la réalisation de prédéformations (traction ou cisaillement) sur de plus grands éprouvettes. Cela permet ensuite par usinage d'échantillons selon des directions bien précises de réaliser des chemins complexes de sollicitation.

Remerciements

Ce projet est mené à bien grâce à l'aide de la Région Wallonne et d'ARCELOR. Il entre également dans le cadre du programme « Pôles d'attraction interuniversitaires » financé par l'Etat belge. Anne Marie Habraken remercie le Fonds National de la Recherche Scientifique qui finance ses travaux.

Références

- Bari, S., Hassan, T. 2001 Kinematic hardening rules in uncoupled modeling for multiaxial ratcheting simulation. *International Journal of Plasticity* 17 (2001) 885 – 905.
- De Montleau, P., Duchêne, L., Flores, P., Habraken, A.M. 2003 Numerical shear test for different elasto-plastic laws – Complas 2003. A publier.
- Duchêne, L., Godinas, A., Cescotto, S., Habraken, A. M. 2002 Micro – macro analysis of steel sheet behaviour in finite element simulations. Application to deep – drawing process. Sixth European Mechanics of Materials Conference (EMMC6), Non linear mechanics of anisotropic materials. University of Liege, Belgium.
- G' Sell C., Boni, S., Shrivastave, S. 1983 Application of the plane simple shear test for determination of the plastic behavior of solid polymers at large strains. *Journal of Material Science* 18 (1983) 903-918.
- Hill, R. 1950 *The mathematical theory of plasticity*. Oxford Classic Texts.
- Hu, Z. 1992 Loi de comportement des métaux en grandes transformations tenant compte de l'évolution de la Microstructure. Doctoral Thesis presented at L'institut National Polytechnique de Grenoble.
- Kuwabara, T., Ikeda, S., Kuroda, K. 1998 Measurement and analysis of differential work hardening in cold – rolled steel sheet under bi-axial tension. *Journal of Material Processing Technology* 80-81, 517 – 523.
- Teodosiu, C. and Hu, Z. 1995 Evolution of the intragranular microstructure at moderate and large strains: Modeling and computational significance, *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications*, Proceedings of Numiform '95, eds. S. Shen & P.R. Dawson, 173-182. Balkema, Rotterdam.
- Piljman, H. 2001 Sheet material characterization by multi-axial experiments". Doctoral Thesis presented at University of Twente.
- Rauch, E. F. 1998 Plastic anisotropy of sheet metals determined by simple shear tests. *Material Science and Engineering* A241, 179-183.
- Zhu, Y.Y., Cescotto, S. 1994 Transient thermal and thermomechanical analysis by F.E.M., *Computers and Structures*, 53(2), 275-304.