

Étude du comportement de plaques minces métalliques sollicitées en torsion plane en quasi-statique

M.ADLAFI^{a,b}, V.GROLLEAU^{a,c}, L.MAHEO^{a,b}, B.GALPIN^{a,b}

a. Univ. Bretagne-Sud, CNRS UMR 6027, IRDL, F 56100 Lorient, France

b. Ecoles de Saint-Cyr Coëtquidan, CREC, F 56380 Guer, France

c. Department of Mechanical and Process Engineering, ETH Zurich, Switzerland

morwan.adlafi@univ-ubs.fr, vincent.grolleau@univ-ubs.fr, bertrand.galpin@univ-ubs.fr,
laurent.maheo@univ-ubs.fr

Résumé :

Dans le dispositif de torsion plane développé, l'extérieur de l'éprouvette est encastré, et le mouvement de rotation est appliqué à la partie centrale par un arbre de torsion présent d'un seul côté de l'éprouvette, et maintenu par un écrou de serrage sur l'autre face, permettant un accès optique à la totalité de la circonférence sollicitée en cisaillement. Le couple maximal transmissible est de 2000 N.m, permettant d'appliquer une contrainte équivalente au sens de Von Mises de l'ordre de 1800 MPa pour un rayon de gorge de 23 mm et une épaisseur en fond de gorge de 0.7 mm, les vitesses de déformation s'échelonnent de 0.001 à 0.1 [1/s] et un second dispositif permettra d'atteindre quelques 100 [1/s]. Cette présentation illustre les capacités du dispositif de torsion plane développé à partir d'essais réalisés sur différents aciers, d'emboutissage, Dual Phase et inoxydable, ainsi que des alliages d'aluminium. Les résultats obtenus pour différentes géométries de gorge sont comparés, et les effets de l'anisotropie du matériau sur les mesures sont mis en évidence.

Abstract :

In the developed in-plane torsion device, the outside of the specimen is fully clamped, and the rotational movement is applied to the inner part of the specimen using a driving shaft with a threaded end. The shaft is present on only on side of the specimen, clamping load is obtained using a nut from the other side. This original feature allows a full optical access to the circumference of the specimen for strain measurements. The maximum loading torque is 2000 N.m, making it possible to test high strength steels up to a Von Mises equivalent stress of 1800 MPa for a groove radius of 23 mm and a groove thickness of 0.7 mm. Actual strain rates ranges from 0.001 to 0.1 [1/s], with a final goal about some 100 [1/s]. This presentation illustrates the capabilities of the in-plane torsion device developed from tests on different steels, deep-drawing, dual phase and stainless steel, as well as aluminum alloys. The results obtained for different groove geometries are compared, and the effect of the anisotropy of the material is illustrated.

Mots clés : Torsion plane, essais expérimentaux, modélisation numérique, écrouissage, anisotropie

1 Introduction

Dans de nombreux cas d'impact sur une plaque mince métallique, la déchirure intervient en cisaillement. Des essais de cisaillement sont alors nécessaires afin de prédire cette rupture. Différents essais de cisaillement standard existent mais présentent plusieurs défauts tels que des déchirures sur les bords libres (S.Thuillier and al [1]) ou des effets de bords sur des éprouvettes optimisées (CC.Roth and al [2]). Il est également difficile d'effectuer des essais de cisaillement cycliques sur des éprouvettes normalisées. Un autre moyen d'étudier le cisaillement sur les plaques minces est de réaliser des essais de torsion plane. L'essai de torsion permet d'atteindre de très grandes déformations sans avoir d'effet de bord et en ayant la possibilité de faire des essais cycliques, mais réclament l'usinage d'une gorge. Les premières études de la torsion sur les plaques minces dates de 1961, puis 1977 avec un article de Duncan and al [3], qui proposaient une approche expérimentale couplée avec un calcul par éléments finis. Tekkaya and al[4][5][6][7] ont récemment proposé un nouveau dispositif d'essai de torsion plane en quasi-statique permettant d'observer les déformations par stéréo-corrélation d'image, sur une partie de l'éprouvette. La forme étudiée par Tekkaya est une plaque où est usinée une gorge circulaire permettant de localiser la déformation et d'obtenir une sollicitation en cisaillement simple. Les niveaux de couple atteints avec les essais existants sont de l'ordre de 1000 N.m pour des épaisseurs de tôle de 0.5 mm dans la gorge. Les essais expérimentaux sont corrélés à des simulations numériques où un modèle de plasticité associée est utilisé avec un modèle de rupture de type Johnson-Cook [8]. Dans notre étude un nouveau dispositif de torsion plane est présenté. Le principe de cet essai est d'appliquer le couple au centre de l'éprouvette par une face seulement, tout en bloquant son extrémité extérieure. Cette technique permet d'observer l'ensemble des champs de déformation sur toute la circonférence de l'éprouvette et d'appliquer des couples de l'ordre de 2000 N.m. Des simulations numériques sont effectuées afin de montrer l'intérêt d'une nouvelle forme d'éprouvette optimisée, et d'illustrer l'influence des paramètres d'anisotropie sur le comportement du matériau en grandes déformations.

2 Étude expérimentale de la torsion plane en quasi-statique

Le dispositif développé (figure 1), a pour principe d'appliquer un mouvement de rotation sur la partie centrale de l'éprouvette à l'aide d'un arbre de torsion depuis une face de l'éprouvette seulement. La transmission du couple est assurée par un serrage axial avec un écrou sur l'autre face de l'éprouvette et un ensemble de gorges radiales usinées sur la partie centrale de l'échantillon. Ainsi, un accès optique à la totalité de la circonférence sollicitée en cisaillement est possible. La partie extérieure de l'éprouvette est encastrée. Le montage actuel est utilisé dans une machine d'essais universelle de traction-torsion.

Le couple maximal transmissible est de 2000 N.m, permettant d'appliquer une contrainte équivalente au sens de Von Mises de l'ordre de 1800 MPa, pour un rayon de gorge de 23 mm et d'épaisseur en fond de gorge de 0.7 mm, les vitesses de déformation s'échelonnent de 0.001 à 0.1 /s . Un dispositif d'acquisition par stéréo corrélation d'image est positionné en face de la partie lisse de l'éprouvette, où un mouchetis est appliqué. La caméra utilisée offre une résolution de 13 MPx et une fréquence d'enregistrement de 60 fps. Des essais sont réalisés sur différents aciers et alliages d'aluminium, une partie du résultat de l'essai sur le DP980 est présentée sur la figure 5.

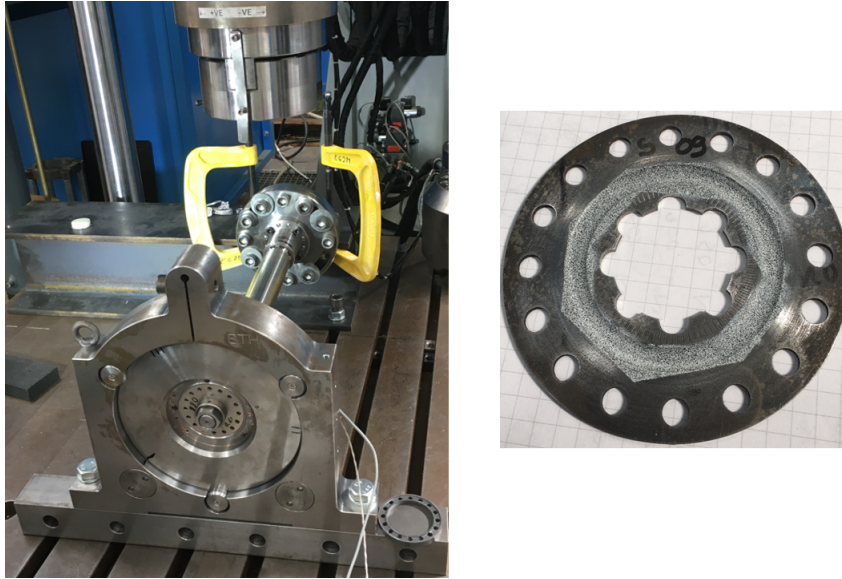


FIGURE 1 – Dispositif expérimental de torsion plane en quasi-statique

3 Modélisation du comportement de l'acier DP980

Afin de décrire au mieux le comportement de l'acier DP980, un modèle de plasticité non-associée de Hill [9] est utilisé avec une loi d'érouissage isotrope mixte de Swift-Voce. Plusieurs chercheurs ont montré l'intérêt d'utiliser ce modèle de plasticité pour l'étude des plaques minces métalliques en grandes déformations, on peut citer Shoutghton [9], Mohr and al [10]

3.1 Modèle de plasticité, HILL-NAFR

La surface de charge est définie par le potentiel f , fonction de la contrainte équivalente au sens de Hill [11].

$$f[\sigma, k] = \bar{\sigma}_{Hill} - k = 0 \quad (1)$$

La contrainte équivalente de Hill est calculée de la façon suivante :

$$\bar{\sigma}_{Hill} = \sqrt{(P\sigma) \cdot \sigma} \quad (2)$$

avec la contrainte de Cauchy σ et P la matrice d'anisotropie :

$$P = \begin{bmatrix} 1 & P_{12} & -(1 + P_{12}) & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{22} & -(P_{22} + P_{12}) & 0 & 0 & 0 \\ -(1 + P_{12}) & -(P_{22} + P_{12}) & 1 + 2P_{12} + P_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Les paramètres P_{12} , P_{22} et P_{33} de la matrice d'anisotropie peuvent être déterminés à l'aide d'essais de traction classiques et d'un essai de traction équi-biaxial. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes découpées suivant les directions 0, 45 et 90 degrés par rapport à la direction de laminage. Les paramètres P sont calculés avec ces formules suivantes :

$$P_{12} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{Y_0}{Y_b} \right)^2 - \left(\frac{Y_0}{Y_{90}} \right)^2 - 1 \right], \quad P_{22} = \left(\frac{Y_0}{Y_{90}} \right)^2 \quad \text{et} \quad P_{33} = \left(\frac{2Y_0}{Y_{45}} \right)^2 - \left(\frac{Y_0}{Y_b} \right)^2 \quad (4)$$

Où Y_0 , Y_{90} , Y_{45} sont les contraintes obtenues pour une déformation de 0.002 respectivement pour les trois orientations de traction, et Y_b est la contrainte limite élastique obtenue avec un essai de traction équi-biaxial.

La direction d'écoulement est définie par le pseudo-potentiel g :

$$d\varepsilon_p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} \quad (5)$$

Où ε_p est la déformation plastique, λ le multiplicateur plastique,

$$g(\sigma) = \sqrt{(G\sigma) \cdot \sigma} \quad (6)$$

avec σ la contrainte de Cauchy et G la matrice d'orientation qui est de la même forme que le matrice d'anisotropie P . Les paramètres G_{12} , G_{22} , G_{33} correspondent à leur définition classique de Hill, et peuvent être exprimés à partir des coefficients de Lankford.

$$G_{12} = -\frac{r_0}{1+r_0}, \quad G_{22} = \frac{r_0}{r_{90}} \cdot \frac{1+r_{90}}{1+r_0}, \quad G_{33} = \frac{1+2r_{45}}{r_{90}} \cdot \frac{r_0+r_{90}}{1+r_0} \quad (7)$$

Les coefficients de Lankford sont calculés à l'aide des résultats des essais de traction réalisés selon différentes orientations α par rapport à la direction de laminage.

$$r_\alpha = \frac{\varepsilon_{2,\alpha}}{\varepsilon_{3,\alpha}} = -\frac{\varepsilon_{2,\alpha}}{\varepsilon_{1,\alpha} + \varepsilon_{2,\alpha}} \quad (8)$$

Pour la matrice P (resp. G), les valeurs $P_{12} = -0.5$, $P_{22} = 1$. et $P_{33} = 3$. permettent d'obtenir un comportement isotrope au sens de Von Mises. Pour l'acier DP980, les paramètres P et G sont donnés dans le tableau suivant 3.1 :

P_{12}	P_{22}	P_{33}	G_{12}	G_{22}	G_{33}
-0.4540	0.9730	3.0990	-0.4394	0.9195	3.3555

3.2 Loi d'écrouissage isotrope mixte Swift-Voce

Pour modéliser l'écrouissage de l'acier DP980, une loi d'écrouissage isotrope mixte Swift-Voce est choisie [12][13].

$$k[\bar{\varepsilon}_p] = \alpha A(\bar{\varepsilon}_p + \varepsilon_0)^n + (1 - \alpha)(k_0 + Q(1 - e^{-\beta \bar{\varepsilon}_p})) \quad (9)$$

Les paramètres matériaux de la loi sont identifiés à l'aide de différents essais de traction uni-axiaux et équi-biaxial. Les paramètres, identifiés pour le DP980, sont donnés dans le tableau suivant 3.2 :

$A(\text{GPa})$	ε_0	n	$Q(\text{GPa})$	β	$k_0(\text{GPa})$	α
1.448	$1.0e^{-7}$	0.09662	0.27457	162.20	0.71452	0.5

4 Étude numérique de la torsion plane en quasi-statique

Une simulation numérique de l'essai est effectuée avec le code de calcul ls-dyna, en intégration temporelle explicite, avec des éléments hexaèdres linéaires à intégration réduite. Une étude de sensibilité au maillage est préalablement réalisée sur une forme d'éprouvette avec une simple gorge de rayon 4 mm, ainsi qu'avec une forme d'éprouvette modifiée. Une loi de comportement isotrope est alors utilisée avec un modèle de plasticité associée et une loi d'écrouissage puissance de type Hollomon [14]. Les paramètres matériaux correspondent à un comportement proche d'un acier DP980, identifié à partir des essais réalisés :

k (GPa)	n
1.22	0.055

Pour les deux géométries de gorge, une partie de 5 degrés de l'éprouvette est modélisée en 3D. La simulation est pilotée en déplacement, avec une rotation angulaire de 5.7 degrés, suivant l'axe Z, appliquée sur les nœuds du rayon intérieur de l'éprouvette conduisant. Les nœuds du rayon extérieur de l'éprouvette sont bloqués. Comme la totalité de l'éprouvette n'est pas modélisée, des conditions cycliques sont appliquées sur les nœuds des surfaces latérales.

Dans la zone cisailée, la forme des éléments est cubique, avec des longueurs d'arête testée de 50 à 220 μm , conduisant à la sélection d'une taille de maille de l'ordre de 50 μm pour la suite de l'étude.

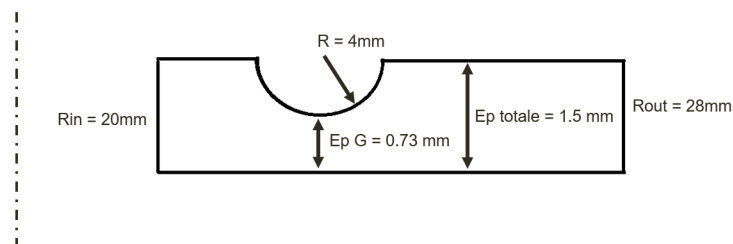


FIGURE 2 – Profil d'une géométrie avec une simple gorge - simple shape

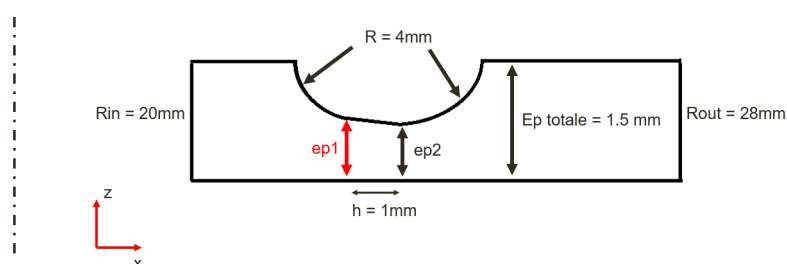


FIGURE 3 – Profil d'une géométrie optimisée - opti shape

4.1 Modification de la forme de l'éprouvette

Deux géométries de gorge sont étudiées et présentées figure (2,3). La forme la plus simple correspond à un simple tore de révolution, de petit rayon ou rayon de gorge de 4 mm, avec une épaisseur minimale de l'ordre de 0.73 mm. Elle a été pour la première fois utilisée par Tekkaya and al [5], dans le but de localiser la déformation en cisaillement simple dans la gorge et d'éviter une localisation aux endroits de l'encastrement central. Les principaux défauts de cette géométrie sont d'une part qu'elle concentre fortement la déformation dans la direction radiale, ce qui peut rendre difficile sa mesure par corrélation d'image ; et d'autre part une dissymétrie de la déformation entre le fond de gorge et la face plane opposée de l'échantillon, avec une différence de l'ordre de 9% illustrée figure 4. Enfin cette géométrie ne permet pas d'avoir de volume à contrainte homogène. Un volume à contrainte constante nécessiterait une forme de gorge évoluant selon une forme quadratique du rayon, forme pouvant être approchée par un cône pour un rayon de l'ordre de 20 mm et sur une longueur de l'ordre de 1 mm. Une nouvelle forme est donc proposée avec une partie conique dans le fond de gorge d'une longueur de 1 mm, encadrée de rayons identiques aux précédents. L'écart entre les déformations calculées en fond de gorge et sur la partie lisse est alors réduit à 4.5%, pour un niveau de déformation effective de 0.6, et permet d'envisager une mesure optique 2D depuis la face plane de l'échantillon. La partie conique permet d'observer un champ de déformation homogène d'environ 2 mm suivant le rayon de l'éprouvette, alors que la forme simple donne un champ observable de l'ordre de 0.2 mm.

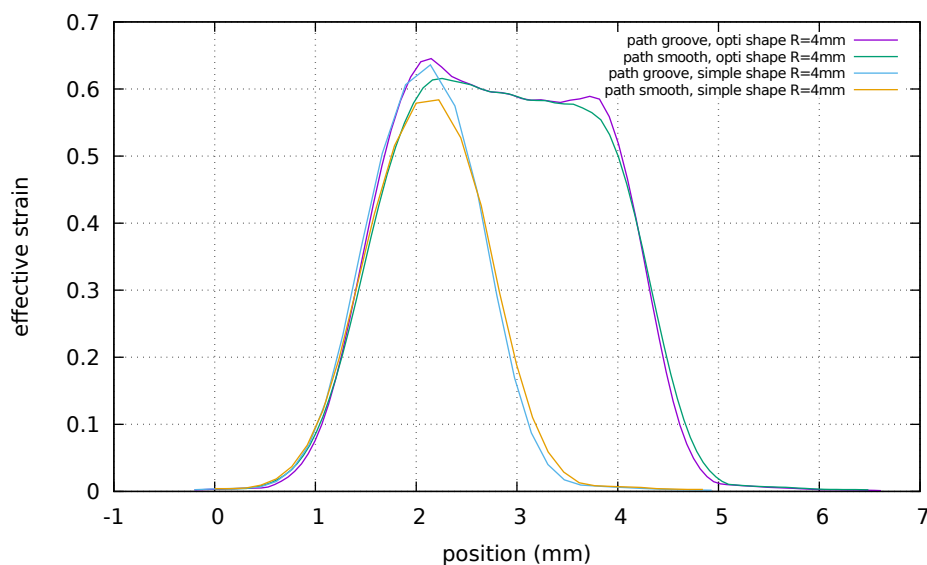


FIGURE 4 – Déformations effectives calculées en fond de gorge et sur la partie lisse de l'éprouvette.

4.2 Influence des paramètres d'anisotropie

Dans cette partie de l'étude, la prise en compte de l'anisotropie impose de mailler la totalité de l'éprouvette en 3D. Une procédure Umat, compilée sur Ls-dyna, intègre le modèle de plasticité non-associée de Hill et la loi d'écrouissage mixte Swift-Voce présentés. Les paramètres matériaux utilisés sont présentés dans la partie modélisation du comportement de l'acier DP980. Les conditions limites sont les mêmes que les études précédentes, avec un déplacement angulaire de 5.7 degrés appliqué aux noeuds du diamètre intérieur de l'éprouvette et un encastrement des noeuds du diamètre extérieur.

Les déformations maximales sur la circonférence de la partie lisse de l'éprouvette sont calculées et tra-

cées sur la figure 5. Le résultat expérimental des déformations maximales mesurées sur l'éprouvette de l'acier DP980 est présenté en pointillé rouge. On remarque que les déformations ne sont pas homogènes le long de la circonférence de l'éprouvette, on observe quatre pics de déformation à environ 0, 90, 180 et 270 degrés, sachant que la direction de laminage du matériau est positionnée à 60 degrés sur le graphe. Le résultat de la simulation, avec les paramètres initiaux du DP980 (courbe verte 5), montre qu'il y a quatre pics de déformation comme dans le résultat expérimental, mais les pics obtenus sont plus élevés (un écart maximum de l'ordre de 12% avec l'expérimental) et décalés angulairement. Une étude sur l'influence des paramètres d'anisotropie est alors effectuée, cherchant à identifier le rôle respectif des paramètres P et G sur les non-symétries calculées. Les équivalents isotropes sont donc employés successivement pour les matrices P et G, en conservant les paramètres identifiés par ailleurs. Le résultat de la simulation avec une matrice G isotrope est proche du résultat de la simulation avec les paramètres initiaux, on retrouve les quatre pics de déformation aux mêmes endroits, l'écart maximal est de 4% entre les deux simulations montrant une faible influence apparente des paramètres d'anisotropie de la direction de l'écoulement plastique. Une deuxième simulation est réalisée avec l'application de paramètres P isotropes (courbe noire 5). Cette fois on observe deux pics de déformation à 45° et 225°, résultat éloigné des phénomènes observés expérimentalement. Ces résultats montrent une forte dépendance du champ de déformation, en symétrie et en valeur, aux paramètres d'anisotropie.

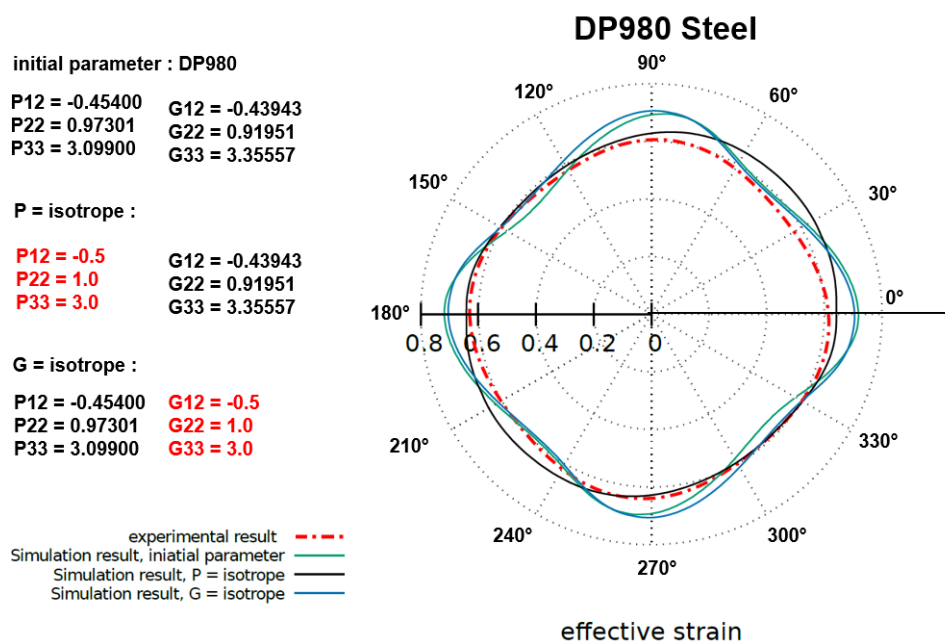


FIGURE 5 – Graphe des déformations maximales calculées sur la partie lisse de l'éprouvette, le long de sa circonférence

5 Discussion

Les différents essais expérimentaux et numériques nous montrent que l'essai de torsion plane apporte de nombreuses informations sur le comportement de plaque mince métallique. Il a été montré qu'une nouvelle forme d'éprouvette avec une partie conique dans la gorge peut être utilisée afin d'améliorer l'homogénéité du champ de déformation à travers l'épaisseur et selon la direction radiale. Cette modification permet d'envisager une mesure du champ de déplacement par une simple caméra sur la face

lisse de l'échantillon grâce à un montage original de l'éprouvette et une transmission du couple via des gorges radiales.

L'influence des paramètres d'anisotropie des matrices P et G du modèle non-associé de Hill est étudiée. Les simulations numériques permettent de retrouver certains phénomènes expérimentaux telles que les pics de déformations. Mais les résultats des simulations sont sensibles à la variation des valeurs des paramètres P en particulier. Cela peut s'expliquer par le fait que les paramètres de la matrice P, sont identifiés à l'aide d'essais de traction jusqu'à 0.2 de déformation. Or l'essai de torsion plane est un essai qui peut conduire à des déformations supérieures à 1.0. Un nouveau dispositif de torsion plane à haute vitesse de déformation est en cours de développement afin d'atteindre des vitesses de déformation de l'ordre 100/s.

Références

- [1] S. Thuillier and P.Y. Manach. Comparison of the work-hardening of metallic sheets using tensile and shear strain paths. *International Journal of Plasticity*, 25(5) :733–751, May 2009.
- [2] Christian C. Roth and Dirk Mohr. Ductile fracture experiments with locally proportional loading histories. *International Journal of Plasticity*, 79 :328–354, April 2016.
- [3] R. Sowerby, Y. Tomita, and J. L. Duncan. In-Plane Torsion Testing of Sheet Metal. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 19(5) :213–220, October 1977.
- [4] Qing Yin, A. Erman Tekkaya, and Heinrich Traphöner. Determining cyclic flow curves using the in-plane torsion test. *CIRP Annals*, 64(1) :261–264, 2015.
- [5] Q. Yin, C. Soyarslan, K. Isik, and A.E. Tekkaya. A grooved in-plane torsion test for the investigation of shear fracture in sheet materials. *International Journal of Solids and Structures*, 66 :121–132, August 2015.
- [6] Qing Yin, Jörg Kolbe, Marco Haupt, and A. Erman Tekkaya. Achieving High Strains in Sheet Metal Characterization Using the In-Plane Torsion Test. *Key Engineering Materials*, 554-557 :77–85, June 2013.
- [7] Heinrich Traphöner, Till Clausmeyer, and A. Erman Tekkaya. Material characterization for plane and curved sheets using the in-plane torsion test – an overview. *Procedia Engineering*, 207 :1934–1939, 2017.
- [8] Gordon R Johnson and William H Cook. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering fracture mechanics*, 21(1) :31–48, 1985.
- [9] Thomas B. Stoughton. A non-associated flow rule for sheet metal forming. *International Journal of Plasticity*, 18(5-6) :687–714, October 2002.
- [10] Dirk Mohr, Matthieu Dunand, and Keun-Hwan Kim. Evaluation of associated and non-associated quadratic plasticity models for advanced high strength steel sheets under multi-axial loading. *International Journal of Plasticity*, 26(7) :939–956, July 2010.
- [11] Rodney Hill. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1033) :281–297, 1948.
- [12] H.W. Swift. Plastic instability under plane stress. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1(1) :1–18, October 1952.

- [13] E Voce. The relationship between stress and strain for homogeneous deformation. *Journal of the Institute of Metals*, 74 :537–562, 1948.
- [14] John H Hollomon. Tensile deformation. *AIME Trans*, 12(4) :1–22, 1945.