

Application de la plasticité Associée et Non Associée pour les tôles inoxydables ferritiques

Oualid Chahaoui*, Salim Boulahrouz*, Makhoul Ledmi*,

*Engineering Sciences and Advanced Materials Laboratory (ISMA), department of mechanical engineering
Laghrou-Abbes University of Khenchela
Corresponding Author oualid.chahaoui@gmail.com

Abstract

The characterization of the drawability of rolled sheets is based on the determination of several features, which serve as a tool of mastering and understanding the behavior of those rolled sheets destined to drawing operations.

The objective of this work is to compare the thresholds functions for the plastic behavior of rolled sheets through quadratic criteria Hill48 of plasticity in case of simple uniaxial stress on the metal's plan for the mechanic values:

- a) Coefficient of anisotropy of Lankford
- b) The yield stresses

Keywords: mechanical modelling, texture, Hill's criterio, associate Flow Rule, Non Associate Flow Rule

1.INTRODUCTION

La transformation rigide des tôles est largement utilisée dans l'industrie actuelle (automobiles, aéronautiques...etc.). La plupart de ces produits sont destinés à l'emboutissage ce qui rajoute une autre étape de traitement mécanique et métallurgique par déformation avant qu'il soit délivré sous sa forme finie. Les procédés du laminage et de l'emboutissage sont fortement influencés par le comportement structural et mécanique notamment les propriétés anisotropes de ces produits. Les tôles produites par le laminage présentent une certaine anisotropie de leurs propriétés mécaniques. L'anisotropie plastique des tôles est généralement caractérisée au moyen d'essais de traction uniaxiale effectués dans le plan de laminage suivant diverses directions faisant un angle θ . Cette étude est menée moyennant un critère populaire de large utilisation Hill 1948[1] en les combinant avec un cadre de travail (Framework) de la plasticité non associée. Le mode d'identification des paramètres d'anisotropie visé a été mené dans les cadres de plasticité (associée et non associée). Pour le premier cadre associé (en anglais : Associated Flow Rule=AFR) le jumelage entre les tenseurs de contrainte et de déformation s'avère inévitable, par contre dans le deuxième cadre (en anglais : Non Associated Flow Rule=NAFR) l'identification se fait par un simple découplage entre les deux tenseurs.

2.PLASTICITE MODERNE (PLASTICITE NON ASSOCIEE)

Dans les travaux publiés par Spitzig et al. [2] et Richmond-Spitzig [3] dans lesquels ont rapporté des données expérimentales incompatibles avec l'exigence de la plasticité associée (AFR) vis à vis la dépendance à la pression hydrostatique (contrainte moyenne dans le tenseur sphérique) de la contrainte d'écoulement au cours la plasticité classique (plastique associé). Le volume final calculé par les composantes du tenseur de déformation dans le cadre de la plasticité associée (AFR) sur la base de la règle de normalité est loin de celle mesurée. Sur la base de ces observations, Stoughton [4] a proposé un nouveau modèle de calcul et de modélisation constitutive pour mettre en forme les matériaux métalliques. Ce modèle a basé la dissociation de la loi de normalité (loi d'évolution) du potentiel plastique qui initialement s'identifie à la fonction seuil (c.à.d. au lieu de calculer la vitesse de déformation à partir de la loi de normalité associée à la fonction seuil (f), on calcule la même vitesse de déformation mais à partir du potentiel plastique (g) d'une manière séparée). Ce qui donne une nouvelle application de la plasticité en découplant l'identification des deux fonctions (f) et (g).

3. CRITERE QUADRATIQUE DE HILL (1948)

En 1948, Hill [1] présente une formulation de la théorie mathématique de la plasticité. Des directions privilégiées interviennent, correspondants à une anisotropie qui conserve trois plans de symétrie dans l'état d'écroutissage du matériau. Les intersections de ces trois plans sont les axes principaux d'anisotropie. Dans ces axes d'orthotropie la contrainte équivalente de Hill s'écrit :

$$f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 2\sigma_0^2 \quad (1)$$

La forme de la surface d'écoulement dans l'espace des contraintes est déterminée par 6 coefficients F , G , H , L , M et N . Dans le cas des tôles métalliques, trois tests de traction à 0° , 45° et 90° par rapport à la direction de laminage sont suffisants. Dans le cas où le chargement est en contrainte plane, l'équation (1) se réduit à l'expression suivante :

$$f(\sigma_{ij}) = (G + H)\sigma_{11}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} + (H + F)\sigma_{22}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 2\sigma_0^2 \quad (2)$$

Si l'on pose $L = M = N = 3F = 3G = 3H$, la relation (1) se réduit au critère de Von Mises correspondant à un matériau incompressible isotrope. La détermination complète de la surface de charge en contrainte plane d'un matériau supposé obéir au critère de Hill passe par l'identification de l'ensemble de ses paramètres. Pour en déduire la contrainte équivalente dans la direction θ :

$$\sigma(\theta) = \frac{2\sigma_0}{(F \sin^4 \theta + G \cos^4 \theta + H \cos^2 2\theta + 2N \sin^2 \theta \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

4. Coefficient d'anisotropie $R(\theta)$

L'anisotropie plastique des tôles est généralement caractérisée par le coefficient de Lankford $R(\theta)$ au moyen d'essais de traction uniaxiale effectués dans le plan de laminage suivant diverses directions faisant un angle θ par rapport à la direction du laminage :

$$r(\theta) = \frac{\dot{\epsilon}_{yy}}{\dot{\epsilon}_{zz}} = \frac{[H \cos^2 2\theta - (F + G - 2N) \cos^2 \theta \sin^2 \theta]}{F \sin^2 \theta + G \cos^2 \theta} \quad (4)$$

5. DÉTERMINATION DES GRANDEURS MÉCANIQUES

▪ Plasticité Associée (AFR)

La détermination des paramètres de l'anisotropie s'effectue à partir du mélange entre les contraintes d'écoulement et les coefficients de Lankford issus de l'expérimental.

➤ Les 04 paramètres de Hill48 s'obtiennent par le biais de l'équation suivante

$$F = \frac{2\sigma_0^2}{\sigma_{90}^2(1+r_{90})}, \quad G = 2 - \frac{2\sigma_0^2 r_{90}}{\sigma_{90}^2(1+r_{90})}, \quad H = \frac{2\sigma_0^2 r_{90}}{\sigma_{90}^2(1+r_{90})}, \quad N = \frac{4\sigma_0^2}{\sigma_{45}^2} - 1 + \frac{\sigma_0^2(r_{90}-1)}{\sigma_{90}^2(1+r_{90})}$$

▪ Plasticité Non Associée (NAFR)

La détermination des paramètres de l'anisotropie s'effectue à partir du découplage du tenseur des contraintes d'écoulement par rapport à celui des déformations (les coefficients de Lankford) issus de l'expérimental.

➤ Les 04 paramètres de Hill48 s'obtiennent par le modèle d'identification suivant :

1- Soit à partir du tenseur de contraintes $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}, \sigma_b$ uniquement.

$$2F = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{90}^2} - 1 + \frac{\sigma_0^2}{\sigma_b^2}, \quad 2G = 1 - \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{90}^2} + \frac{\sigma_0^2}{\sigma_b^2}, \quad 2H = 1 + \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{90}^2} - \frac{\sigma_0^2}{\sigma_b^2}, \quad 2N = \frac{4\sigma_0^2}{\sigma_{45}^2} - \frac{\sigma_0^2}{\sigma_b^2}$$

2- Soit à partir des coefficients de Lankford r_0, r_{45}, r_{90} uniquement.

$$F = \frac{r_0}{r_{90}(1+r_0)}, \quad G = \frac{1}{(1+r_0)}, \quad H = \frac{r_0}{(1+r_0)}, \quad N = \frac{(1+2r_{45})(r_0+r_{90})}{2r_{90}(1+r_0)}$$

6.APPLICATION

Le matériau d'étude est en acier inoxydable ferritique fourni par le groupe Arcelor-Mittal-Steel (division-Stainless-Europe) sous forme de tôle mince de 1 mm d'épaisseur. Il fait partie de la famille AISI 439-430Ti (EN 1. 4510) dont la dénomination européenne correspond à la désignation X3CrTi17. Les essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes normalisées sous chargement uniaxial utilisant une machine de type INSTRON modèle 1186 de force de 200 KN de l'École des Mines de Saint Etienne. La charge de la machine a été fixée à $F_0 = 0.2 \text{ KN}$ et la vitesse de déplacement imposée à la traverse à 0.008m/s. [Le tableau1](#) présente les résultats de caractérisation.

Tableau 1: Propriétés Mécaniques Experimentales

Direction	ν	σ_e (0.2% offset) (MPa)	r
0°		278	0.7
45°	0.3	283	1..41
90°		271	0.82

Les valeurs mesurées de la contrainte d'écoulement selon les différentes directions dans le plan de la tôle, sont illustrée en [Figure 1](#) pour une déformation de 2%. Chahaoui et al. (2010) [5-6]. Il faut noter que la contrainte équilibriauxiale σ_b est supposée égale à l'unité $\sigma_b = 1$.

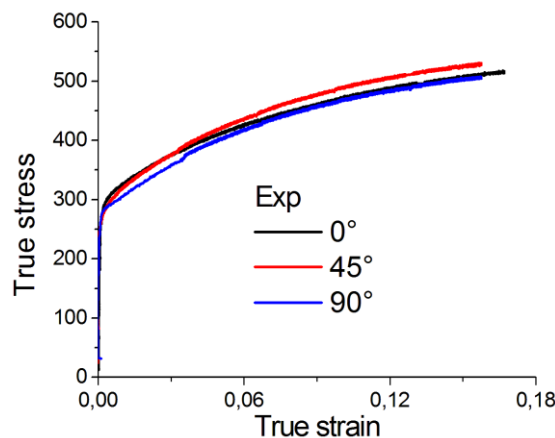


Fig. 1 Characterisation Uniaxiale Experimentales

7.RESULTATS GRAPHIQUES

La variation de l'anisotropie des contraintes $\sigma(\theta)$ et de coefficient de Lankford $r(\theta)$ dans le plan de tôle est adressée ci- dessous.

1- Identification des paramètres associés au critère

Hill48	F	G	H	N
Associée	0,5791	0,5250	0,4749	1,5039

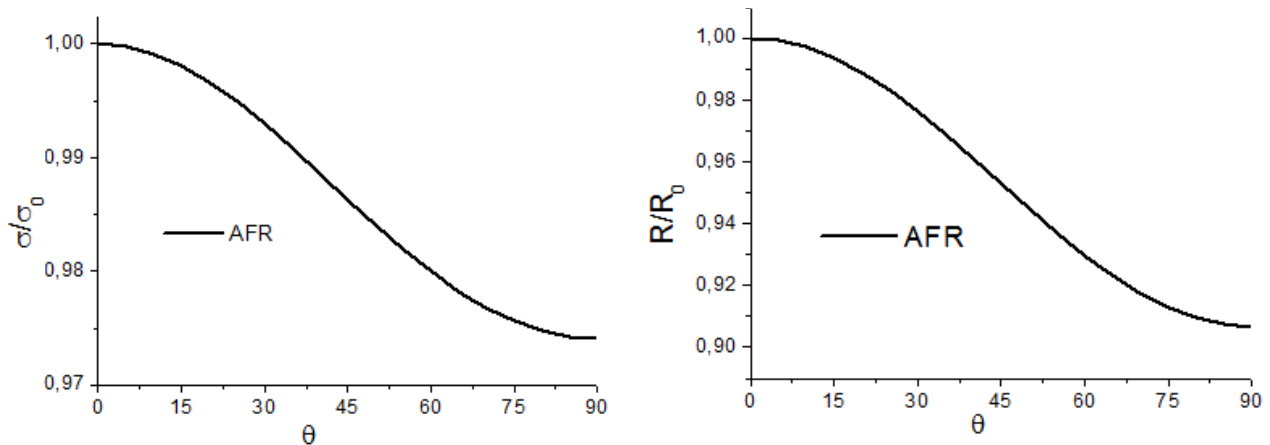


Fig. 2 Résultats de prévision dans le cadre plasticité associée (AFR) pour les contraintes $\sigma(\theta)$ et de coefficient de Lankford $r(\theta)$

2- Identification des paramètres non associés des deux critères

a- Identification uniquement par les contraintes d'écoulement

Hill48	F	G	H	N
Non Associée	0,5270	0,4729	0,5270	1,4336

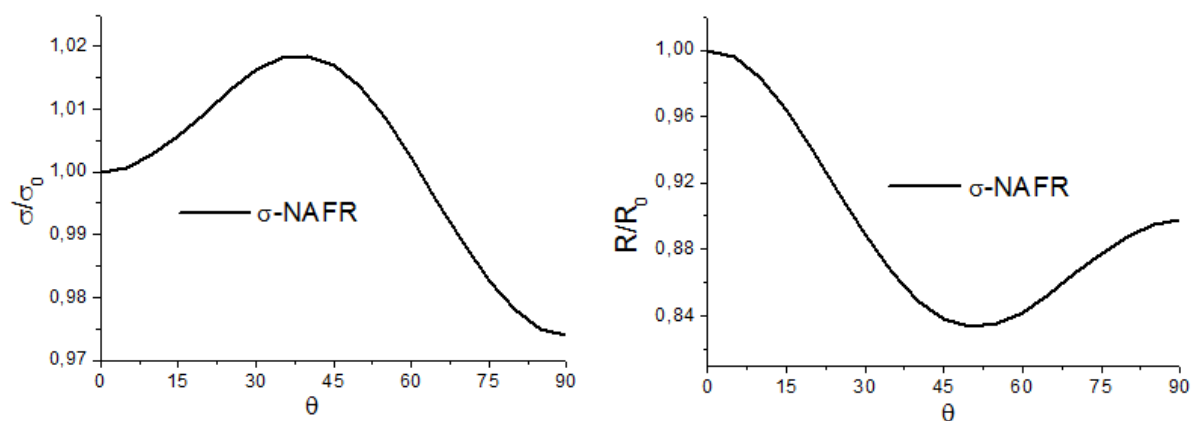


Fig. 3 Résultats de prévision dans le cadre plasticité non associée (NAFR) des contraintes $\sigma(\theta)$

b- Identification uniquement par les coefficients de Lankford

Hill48	F	G	H	N
Non Associée	0,5021	0,5882	0,4117	2,0826

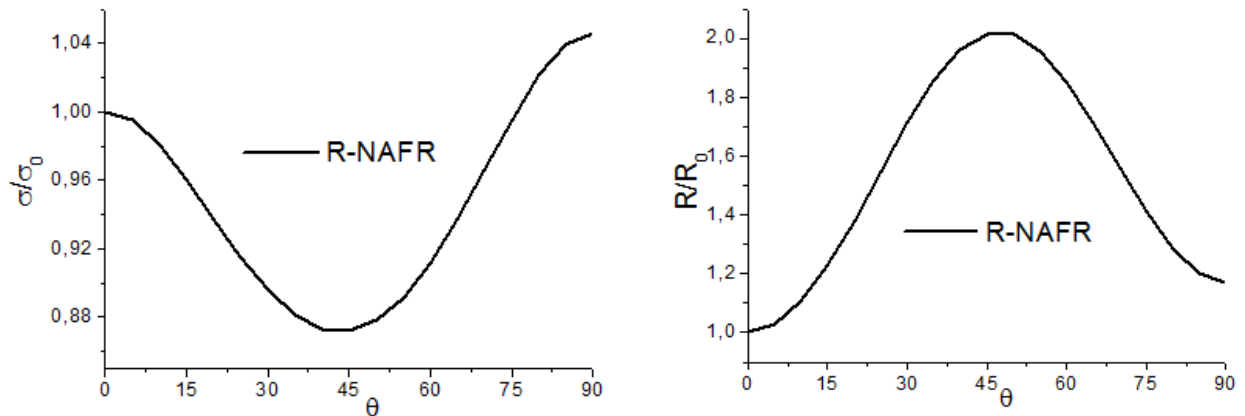


Fig. 4 Résultats de prévision dans le cadre plasticité non associée (NAFR) des déformation (coefficient de Lankford $r(\theta)$)

Comme un résultat partiel de cette comparaison, on peut constater que l'utilisation de la plasticité non associée au critère d'écoulement présente un meilleur ajustement des résultats avec l'expérimental (voir [figure 5](#) ci-dessous).

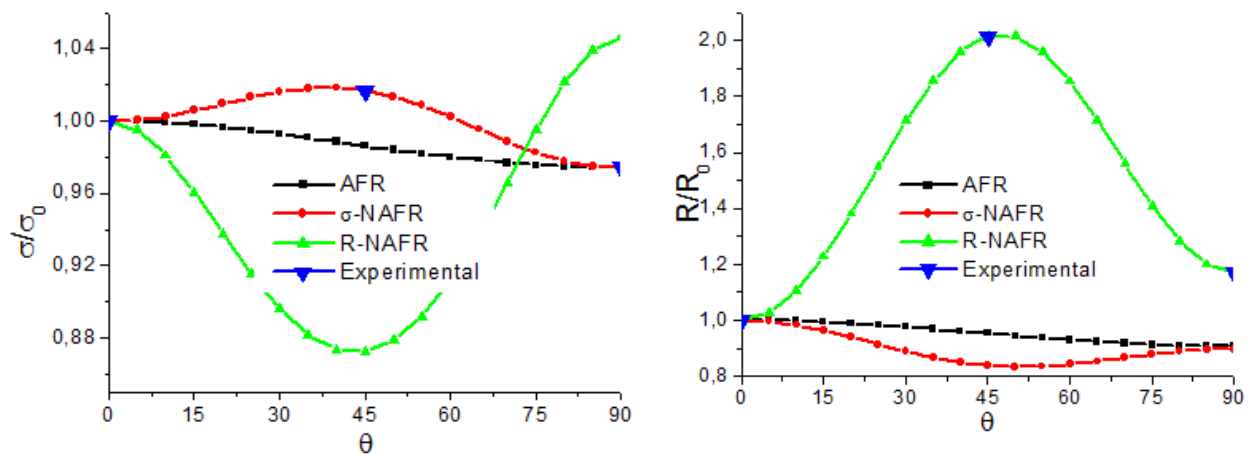


Fig. 5 Résultats de prévision dans le deux cadres plasticités plasticité et non associée (AFR and NAFR).

8.CONCLUSIONS

Dans un premier temps, l'analyse du cas classique d'une tôle homogène a permis de montrer que les résultats peuvent être sensiblement différents suivant que l'essai le cadre de plasticité appliquée à ce type des tôles, plasticité associée (hypothèse communément admise= non influence de la pression hydrostatique) ou non associée (changement de volume au cours de déformation). Le cas d'une tôle homogène l'évolution des paramètres d'anisotropie de contraintes et de déformations dans le plan de la tôle et dans le cadre de l'hypothèse de plasticité associée montre bien l'importance que l'identification des paramètres d'anisotropie (F, G, H et N) issus du jumelage des contraintes et des valeurs du coefficient de Lankford, présente une variation diamétralement opposée entre l'expérimental et le prévisionnel.

Par contre pour le cas de la détermination des paramètres de l'anisotropie s'effectue à partir du découplage du tenseur des contraintes d'écoulement par rapport à celui des déformations (les coefficients de Lankford) en donnant une très bonne cohérence et concordance avec les résultats expérimentaux. La même allure d'évolution pour la plupart des orientations dans le plan de la tôle destinée à l'emboutissage

9.References

- [1] -R. Hill. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proc. Roy. Soc. London, **A193**, 281 (1948).
- [2] W.A Spitzig, R.J Sober, and O Richmond, "Pressure dependence of yielding and associated volume expansion in tempered martensite ". Acta Metallurgica, 23(7):885 – 893, 1975.
- [3] W.A. Spitzig and O. Richmond, The effect of pressure on the flow stress of metals''. Acta Metallurgica, 32(3):457 – 463, 1984.
- [4] T.B. Stoughton, "A non-associated flow rule for sheet metal forming''. International Journal of Plasticity, 18(5–6):687–714, 2002.
- [5] - Chahaoui O (2010) Modélisation mécanique et l'étude expérimentale d'une tôle ferritique présentant des hétérogénéités texturales (gradient de texture et écart à l'orthotropie). PhD Thesis, Université d'Annaba, Algeria
- [6]- N. Brinis, B. Regaiguia, O. Chahaoui, N. Maatougui, M. L Fares ' *Modelling Mechanical Properties of AISI 439-430Ti Ferritic Stainless-Steel Sheet*'', Journal of Solid Mechanics Vol. 11, No. 2, pp 425-439. DOI: 10.22034/JSM.2019.665911, (2019).