



HAL
open science

Détermination numérique de courbes limites de formage en fonction de la température pour un alliage d'aluminium 5086

Xingrong Chu, Lionel Leotoing, Dominique Guines, Eric Ragneau

► **To cite this version:**

Xingrong Chu, Lionel Leotoing, Dominique Guines, Eric Ragneau. Détermination numérique de courbes limites de formage en fonction de la température pour un alliage d'aluminium 5086. 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. pp.1-6. hal-00953786

HAL Id: hal-00953786

<https://hal.science/hal-00953786>

Submitted on 28 Feb 2014

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.

Détermination numérique de courbes limites de formage en fonction de la température pour un alliage d'aluminium 5086

X. Chu^a, L. Léotoing^a, D. Guines^a, E. Ragneau^a

a. Université Européenne de Bretagne, INSA-LGCGM, 20 avenue des Buttes de Coësmes, 35043 RENNES Cedex, France

Résumé :

L'évaluation précise de la formabilité des tôles pour les conditions opératoires (température et vitesse de déformation) rencontrées au cours d'un procédé de mise en forme permet de fiabiliser les résultats issus de la simulation numérique du procédé. La mise en forme de tôles à chaud peut conduire à un gain de formabilité qu'il est indispensable de prendre en compte lors du développement d'outils prédictifs des CLF (Courbes Limites de Formage). La mise en place d'un modèle simple de type Marciniak et Kuczynski (M-K), basé sur une formulation par Éléments Finis, a permis de mettre en évidence l'influence du type de loi identifiée pour un alliage d'aluminium 5086 sur le tracé des CLF.

Abstract :

Accurate assessment of the sheet formability incorporating the operating conditions (temperature and strain rate) encountered during a forming process enables more reliable results from the numerical simulation process. The warm sheet forming technique can increase the formability greatly and it should be taken into account when developing predictive tools of FLC (Forming Limit Curves). The development of a simple Marciniak and Kuczynski (M-K) model, based on a Finite Element formulation, has highlighted the influence of mechanical behavior identified for an aluminium alloy 5086 on the determination of FLC

Mots clefs : Courbes Limites de Formage (CLF) ; Température ; Alliages d'aluminium

1 Introduction

Les alliages d'aluminium font l'objet d'applications structurelles de plus en plus nombreuses dans les secteurs automobile et aéronautique. Les avantages qu'ils présentent, notamment en termes de légèreté et de propriétés anti-corrosion, renforcent leur utilisation par rapport aux aciers plus traditionnels. Néanmoins, à température ambiante, la formabilité des alliages d'aluminium est généralement plus faible que pour ces derniers. De nombreuses études ont montré qu'une augmentation de la température de mise en forme des tôles en alliages d'aluminium conduisait à améliorer de manière significative leur formabilité ([7], [3]). La mise au point de procédés de mise en forme à chaud présente donc un réel intérêt et l'optimisation de ces procédés nécessite de connaître précisément l'influence de la température sur ces matériaux.

Les effets de la température sur un alliage d'aluminium Al-Mg (5083) ont notamment été étudiés par Naka *et al* [5]. Différentes vitesses de formage ont été testées sur une plage de température allant de l'ambient jusqu'à 300°C. Le niveau des déformations limites augmente significativement lorsque la température est supérieure à 150°C. Il est également montré que l'augmentation de la vitesse de formage, et donc de la vitesse de déformation, a un effet négatif sur la formabilité. Des conclusions identiques sont présentées par Zhang *et al* [10] pour un alliage d'aluminium de la même famille (5086).

Malgré de nombreuses limitations, l'utilisation d'une courbe limite de formage (CLF) pour quantifier la formabilité d'un matériau reste largement répandue. Cependant, la difficulté de mise en œuvre de dispositifs expérimentaux de caractérisation en température ou en vitesse des CLF limite l'obtention de bases expérimentales fiables. Peu de modèles prédictifs du niveau de formabilité, qu'ils soient analytiques ou numériques, intègrent la température et surtout proposent une corrélation avec des résultats expérimentaux. De nombreux modèles prédictifs des limites de formabilité sont basés sur le modèle classique de Marciniak et Kuczynski (M-K) [4]. Ce modèle consiste à incorporer un défaut géométrique dans l'épaisseur d'une plaque afin de favoriser l'apparition d'une striction localisée. L'inconvénient majeur de ce modèle réside dans la grande sensibilité des résultats vis-à-vis de la valeur de ce défaut. De plus, une utilisation simple du modèle M-K est généralement conditionnée par la prise en compte de comportements thermoélasto-plastiques simplistes, pas toujours représentatifs du comportement du matériau étudié. Une alternative à l'utilisation de ces modèles analytiques consiste à modéliser le modèle M-K à l'aide de la méthode des éléments finis. Cette approche permet ainsi d'intégrer des formulations rhéologiques plus riches et surtout plus réalistes. L'objectif étant de proposer un modèle prédictif simple mais suffisamment riche pour prendre en compte les conditions de mise en œuvre des procédés comme la température ou la vitesse de déformation.

Dans cette étude, seul l'effet de la température sera considéré. Suite à une campagne d'essais de traction sur des éprouvettes uniaxiales, menée sur une large plage de température, les paramètres de trois formulations différentes de lois d'érouissage sont identifiés pour un alliage d'aluminium 5086. Ces lois sont ensuite utilisées pour tracer des CLF numériques grâce à une modélisation EF du modèle M-K. La comparaison des CLF ainsi obtenues montre à quel point la phase d'identification du comportement thermo-élastoplastique du matériau est primordiale pour une estimation précise de la formabilité.

2 Lois d'érouissage identifiées

Dans la littérature, de nombreuses formulations existent pour prendre en compte l'effet de la température sur le comportement élastoplastique des alliages métalliques. Néanmoins, concernant les alliages d'aluminium, assez peu de lois ont finalement été proposées. Il est généralement admis que ces alliages présentent une saturation de la contrainte admissible pour de grandes déformations. Ainsi, plusieurs lois de type Voce ont été développées et évaluées avec succès pour différentes nuances, tel que le 5754 [8], le 8011 ou le 3105 [1]. Deux lois formulées à partir d'une approche phénoménologique et incluant un terme de type Voce sont donc proposées pour la suite de notre étude. Une troisième loi, basée sur l'approche physique de Zerilli-Armstrong [9], est choisie puis modifiée afin d'améliorer la modélisation des effets de la température pour l'alliage d'aluminium étudié.

2.1 Modèle H-V

La loi d'érouissage proposée dans le modèle H-V [6] est donnée ci-dessous (eq. 1) dans laquelle $\bar{\sigma}$, $\bar{\varepsilon}$ et $\dot{\bar{\varepsilon}}$ représentent la contrainte équivalente, la déformation équivalente et la vitesse de déformation équivalente. Les valeurs de la fonction h évoluent en fonction de la température.

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + (\alpha(T)f_H + (1 - \alpha(T))f_V)h(T) \quad (1)$$

Les fonctions f_H et f_V correspondent respectivement à des formulations de type Hollomon et Voce (eq. 2). La fonction $\alpha(T)$ permet de pondérer ces deux fonctions, ainsi, plus la température est élevée et plus le terme de saturation de Voce possédera un poids important dans la formulation.

$$\begin{aligned} \alpha(T) &= \alpha_1 - \alpha_2(T - T_0) \\ f_H &= k_1 \bar{\varepsilon}^{n_1} \\ f_V &= k_2 (1 - e^{-k_4 \bar{\varepsilon}}) \\ h(T) &= \exp(\beta/T) \end{aligned} \quad (2)$$

Dans l'équation 1, σ_0 correspond à la limite élastique du matériau et les paramètres α_1 , α_2 , k_1 , k_2 , k_4 , n_1 et β de l'équation 2 sont des constantes à identifier.

2.2 Modèle Lin-Voce

La formulation choisie ici est de type Voce (eq. 3) dans laquelle l'effet de la température est pris en compte par l'intermédiaire de la fonction multiplicative $k(T)$. Une évolution linéaire de la fonction $k(T)$ en fonction de la température ($k(T) = k_1 + k_2T$) s'est avérée suffisante pour décrire l'effet de la température sur l'érouissage du matériau.

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + k(T)\sqrt{1 - e^{-k_3\bar{\epsilon}}} \quad (3)$$

L'avantage de cette formulation porte sur le nombre de paramètres à identifier, bien inférieur à celui de la loi précédente.

2.3 Modèle Lin-ZA

Le modèle de Zerilli-Armstrong (ZA) est un modèle physique basé sur l'étude du mouvement des dislocations dont la formulation varie suivant la structure cristallographique du matériau étudié. Pour une structure CFC, le modèle de ZA s'écrit comme suit (eq. 4) :

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + k\bar{\epsilon}^n \exp(-(\alpha_1 - \alpha_2(\ln\dot{\bar{\epsilon}}))T) \quad (4)$$

Compte tenu des effets de la température sur l'alliage d'aluminium étudié, deux termes linéaires sont introduits dans la formulation classique de ZA (eq. 5).

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + (k_0 - k_1T)\bar{\epsilon}^{n_0 - n_1T} \exp(\alpha_2(\ln\dot{\bar{\epsilon}})T) \quad (5)$$

Dans cette formulation, les paramètres k_0 , k_1 , n_0 , n_1 et α_2 sont des constantes matériau à identifier.

2.4 Identification des paramètres

L'identification des différents paramètres introduits dans les trois formulations choisies a été réalisée à partir d'une procédure d'analyse inverse s'appuyant sur des résultats d'essai de traction uniaxiale sur éprouvettes à section variable. Ces essais ont été menés à quatre températures différentes ($20^\circ C$, $230^\circ C$, $290^\circ C$ et $350^\circ C$) et pour une vitesse imposée de $10mm/s$. Compte tenu du faible niveau de vitesse de déformation engendré dans l'éprouvette, seul l'effet de la température sera considéré. Les courbes force-temps expérimentales et identifiées sont comparées sur la figure 1 pour les trois formulations choisies.

La figure 1 montre que les trois formulations semblent assez bien adaptées pour modéliser l'effet de la température sur l'érouissage du 5086. Parmi les trois lois, le modèle Lin-Voce (Figure 1-b) est certainement celui qui présente la meilleure corrélation pour l'ensemble des températures, ce qui est d'autant plus intéressant compte tenu du faible nombre de paramètres à identifier.

3 Tracé et comparaison des CLF

3.1 Modèle EF de Marciniak et Kuczynski

Le modèle numérique utilisé pour tracer des courbes limites de formage en température s'appuie donc sur le modèle classique de Marciniak et Kuczynski, dans lequel on retrouve une zone d'imperfection (zone b) (Figure 2) dont l'épaisseur e_b est définie à partir de l'épaisseur e_a de la zone homogène (zone a) et du rapport d'imperfection $f_0 = e_b/e_a$.

L'orientation principale du défaut est ajustée de manière à minimiser les déformations limites calculées. La modélisation volumique de la plaque, construite à partir d'éléments hexaèdres à 8 nœuds, est réalisée sous ABAQUS. L'utilisation de la subroutine UHARD permet de simuler les trois lois d'érouissage précédemment identifiées. Le modèle est piloté en déplacements. Le rapport de ces deux déplacements permet de faire varier le chemin de déformation et de parcourir ainsi toute la courbe limite de formage.

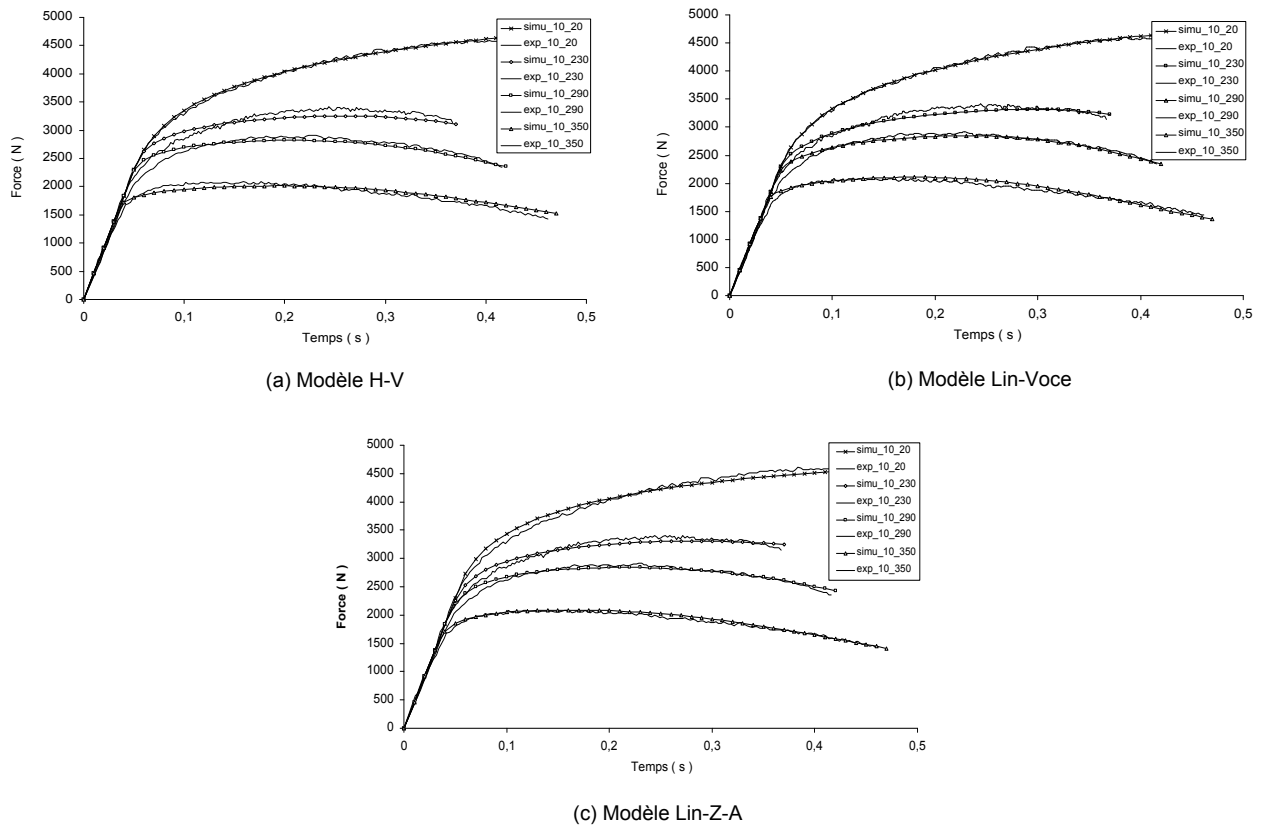


FIGURE 1 – Comparaison des courbes Force-Temps expérimentales et identifiées pour les trois formulations étudiées : (a) modèle H-V, (b) modèle Lin-Voce et (c) modèle Lin-ZA

L'apparition de la striction est détectée à partir du tracé du rapport des incréments de déformations équivalentes calculées pour des éléments A et B situés respectivement dans les zones a et b. Lorsque ce rapport dépasse la valeur critique de 7 [2], l'état de déformation dans la zone a, associé à un chemin de déformation, est retenu pour calculer les déformations majeures et mineures sur la courbe limite de formage. Cependant, le calcul du niveau de formabilité est fortement dépendant de la valeur du défaut géométrique du modèle M-K (rapport f_0). Il reste donc à identifier, pour chaque comportement élastoplastique, la valeur de ce défaut. La détermination de la valeur du défaut est réalisée à partir d'une mesure expérimentale des déformations limites obtenue pour un essai de traction simple sur éprouvette à section variable [10].

3.2 Résultats et discussion

L'influence de la loi d'écroutissage sur le tracé des courbes limites de formage est étudiée à la température de 230°C . Pour chaque formulation, le défaut géométrique est déterminé de manière à recalculer la CLF numérique sur le point expérimental obtenu à cette même température $(-0,089; 0,32)$.

Malgré la très bonne corrélation observée entre les courbes expérimentales et les courbes identifiées force-temps pour les trois formulations, la figure 3 met en évidence une influence certaine de la loi d'écroutissage sur le tracé des CLFs numériques. Cette influence est surtout marquée dans la zone la plus critique de la CLF, celle qui correspond à une déformation mineure nulle. Dans la zone d'expansion biaxiale, les CLFs présentent également quelques différences. Ce dernier point s'explique certainement par la méthode d'identification des paramètres rhéologiques des lois. En effet, les essais de traction uniaxiale ne permettent pas d'atteindre les niveaux de déformation équivalente rencontrés pour ce mode de déformation, le choix de l'une de ces lois peut alors s'avérer plus ou moins précis et pertinent.

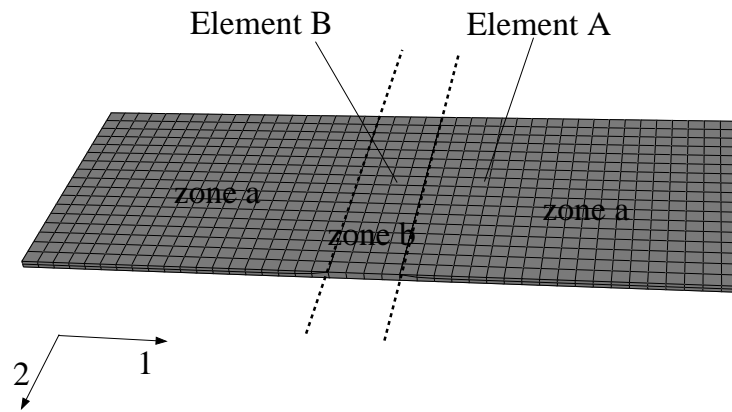


FIGURE 2 – Modélisation EF du modèle de Marciniak et Kuczynski

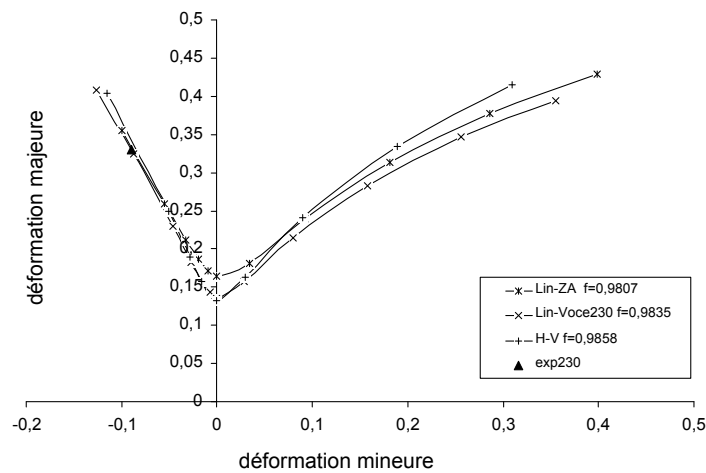


FIGURE 3 – Influence de la loi d'érouissage sur le tracé des CLF numériques

On note sur la figure 3, la valeur des défauts géométriques déterminée pour chaque loi, ces valeurs sont assez proches et confirment que celle-ci est finalement bien associée à un matériau donné. Les CLFs présentées sur la figure 3 sont obtenues en utilisant le critère de plasticité de von Mises. Il est bien connu que le choix du critère de plasticité a également une influence sur la forme des CLFs, ce point est illustré par la figure 4. Sur ces tracés, l'utilisation d'un critère anisotrope de Hill, associé au modèle Lin-Voce, conduit à surestimer la formabilité du matériau dans la zone d'expansion alors qu'aucune influence n'est notée dans la zone de rétreint. Même si ce matériau présente une très faible anisotropie, le choix d'un critère de plasticité adapté s'avère également être une étape indispensable pour prédire avec précision le tracé des CLFs numériques.

4 Conclusions

Le développement d'un outil numérique adapté au tracé de courbes limites de formage pour différentes conditions de mise en oeuvre des procédés de formage des tôles, est une alternative intéressante aux campagnes expérimentales fastidieuses et parfois incertaines de tracé des CLFs. L'utilisation du modèle classique de Marciniak et Kuczynski peut s'avérer pertinente à condition d'identifier précisément le comportement thermo-élastoplastique du matériau concerné (lois d'érouissage et critère de plasticité). Cette identification est d'autant plus difficile que le niveau de déformation atteint pour certains chemins

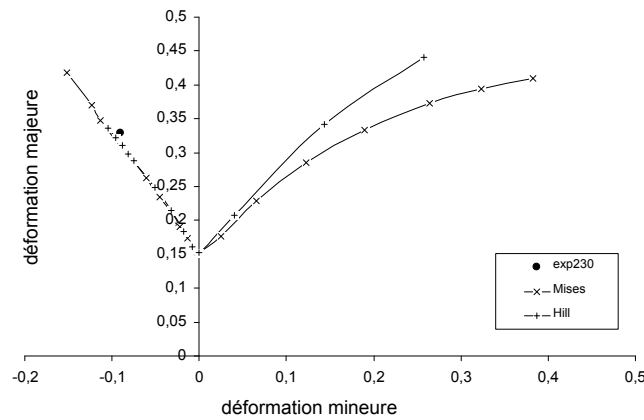


FIGURE 4 – Influence du critère de plasticité sur le tracé des CLF numériques

de déformation est relativement élevé, bien supérieur à celui observé lors d'un essai de caractérisation classique de traction uniaxiale. Le calibrage du défaut géométrique du modèle M-K est également une étape essentielle. Dans ce travail, le calibrage a été possible en utilisant un point issu de l'essai de traction uniaxiale mais il serait certainement plus pertinent et plus précis pour le modèle de choisir le point correspondant à une déformation mineure nulle. Cette procédure sera testée dans les prochains mois et une campagne de validation est actuellement en cours sur un dispositif expérimental de type Marciniak fonctionnant en température et permettant d'atteindre des vitesses de déformation relativement élevées.

Références

- [1] Aghaie-Khafri, M., Mahmudi, R. 2004 Predicting of plastic instability and forming limit diagrams *International Journal of Mechanical Sciences* **46** 1289-1306
- [2] Banabic, D., Comsa, S., Jurco, P., Cosovici, G., Paraianu, L., Julean, D. 2004 FLD theoretical model using a new anisotropic yield criterion *Journal of Materials Processing Technology* **157-158** 23-27
- [3] Li, D., Ghosh, A. 2004 warm forming behaviour of aluminium sheet alloys *Journal of Materials Processing Technology* **145** 281-293
- [4] Marciniak, Z., Kuczynski, K. 1967 Limit strains in the processes stretch-forming sheet metal *International Journal of Mechanical Sciences* **9** 609-620
- [5] Naka, T., Torikai, G., Hino, R., Yoshida, F. 2001 The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminium-magnesium alloy sheet *Journal of Materials Processing Technology* **113** 648-653
- [6] Sung, J. H., Kim, J. H., Wagoner, R. 2010 A plastic constitutive equation incorporating strain, strain-rate, and temperature *International Journal of Plasticity* **26** 1746-1771
- [7] Toros, S., Ozturk, F., Kacar, I. 2008 Review of warm forming of aluminium-magnesium alloys *Journal of Materials Processing Technology* **207** 1-12
- [8] Williams, B.W., Simha, C.H.M., Abedrabbo, N., Mayer, R., Worswick, M.J. 2010 Effect of anisotropy, kinematic hardening, and strain-rate sensitivity on the predicted axial crush response of hydroformed aluminium alloy tubes *International Journal of Impact Engineering* 652-661
- [9] Zerilli, F.J., Armstrong, R.W. 1987 Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations *Journal of Applied Physics* **61** 1816-1825
- [10] Zhang, C., Léotoing, L., Guines, D., Ragneau, E. 2010 Experimental and numerical study on effect of forming rate on AA5086 sheet formability *Materials Science and Engineering A* **527** 967-972