



HAL
open science

Identification d'endommagement ductile des tôles minces par micro-formage incrémental: application au modèle de Gurson

Karim Belouettar, Sébastien Thibaud, Mohand Ould Ouali

► **To cite this version:**

Karim Belouettar, Sébastien Thibaud, Mohand Ould Ouali. Identification d'endommagement ductile des tôles minces par micro-formage incrémental: application au modèle de Gurson. 25e Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280049

HAL Id: hal-04280049

<https://hal.science/hal-04280049v1>

Submitted on 13 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.

Identification d'endommagement ductile des tôles minces par micro-formage incrémental: application au modèle de Gurson

K. BELOUETTAR^a, S. THIBAUD^b, M. OULD OUALI^c

- a. Laboratoire des Techniques Avancées de Fabrication et Contrôle, LTAFC, Ecole Militaire Polytechnique, bordj el bahri 16111, Alger, Algérie
Belouettar_karim@yahoo.fr
- b. FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS/UFC/ENSMM, 25000 Besançon, France
- c. Laboratoire Élaboration et Caractérisation des Matériaux et Modélisation (LEC2M), Université Mouloud MAMMERI, BP 17RP, 15000 Tizi-Ouzou, Algérie

Résumé :

Le formage incrémental mono-point (SPIF) est une nouvelle technologie qui permet d'obtenir des pièces complexes à l'aide d'un outil à bout hémisphérique en appliquant un processus de déformation locale à la tôle. Comprendre les mécanismes de déformation et de rupture dans le SPIF est important afin d'améliorer la formabilité. Généralement, les modèles de plasticité de type Gurson sont largement utilisés pour la prédiction de l'évolution de l'endommagement et de la rupture. Cette étude a pour but, l'identification du modèle d'endommagement GTN pour la prédiction du comportement des matériaux sous différents états de contrainte. Un algorithme explicite d'intégration des contraintes est développé pour implémenter le modèle dans un code d'éléments finis. La procédure de l'identification du modèle est basée sur la comparaison de la prédiction des efforts de micro-formage incrémental expérimentale d'une forme pyramidale et du modèle numérique équivalent. Enfin, pour démontrer la capacité prédictive du modèle GTN, les résultats expérimentaux d'un test micro-SPIF de différentes trajectoires d'outils et formes géométriques sont comparés à leur modèle numérique en tenant compte des paramètres identifiés. Il est démontré que le modèle GTN est capable de prédire la rupture dans le procédé de formage des tôles minces.

Mots clés : Micro-formage incrémental. Modèle GTN. Endommagement ductile. Méthode des éléments finis. Identification. Méthode inverse.

1 Introduction

Le formage incrémental est une nouvelle technologie considérée comme un procédé prometteur pour la production des pièces métalliques à l'aide d'un outil de forme simple piloté par une machine à Commande Numérique. Il consiste à déformer localement une tôle avec un outil de formage non coupant de type poinçon hémisphérique selon une trajectoire introduite dans la machine CN [1].

L'objectif principal pour ce travail était l'identification des paramètres d'un modèle d'endommagement ductile de type GURSON (GTN) [2] à partir de la comparaison des résultats expérimentaux avec ceux obtenus par des simulations numériques effectuées dans l'environnement ABAQUS/Explicit selon une procédure d'identification en deux étapes à savoir : une première avec un essai de traction uni-axial et puis par essai de micro-formage incrémental mono-point.

Pour la loi de comportement, un modèle micromécanique GTN est choisi pour la prédiction de l'endommagement et de la rupture ductile des matériaux [2]. Dans sa forme de base, ce modèle ne représente que la croissance de la porosité pour quantifier la dégradation du matériau. Plus tard le modèle de Gurson étendu par Tvergaard et Needleman [3] en ajoutant de nouveaux paramètres d'endommagement à l'expression de la surface d'écoulement et par l'introduction de phénomènes de nucléation et de coalescence. Avec ces modifications est apparue une extension du modèle de Gurson, défini comme le modèle du GTN et il s'exprime par :

$$\phi = \left(\frac{\sigma_{eqv}}{\sigma_y} \right)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left(-3q_2 \frac{\sigma_m}{2\sigma_y} \right) - \left(1 + (q_1 f^*)^2 \right) = 0$$

Où σ_{eqv} est la contrainte équivalente de von Mises, initialement égale à σ_0 (limite d'élasticité), σ_m est la contrainte hydrostatique, q_1, q_2 sont les coefficients de Tvergaard et f^* (f) la fonction définit la fraction de volume de vide dans le modèle de GTN.

Le matériau est modélisé par la fonction d'élasticité de von Mises et la loi d'écrouissage isotrope de Voce [4], pour la description de l'évolution plastique.

$$\sigma = \sigma_y + Q(1 - \exp(-b\varepsilon^p))$$

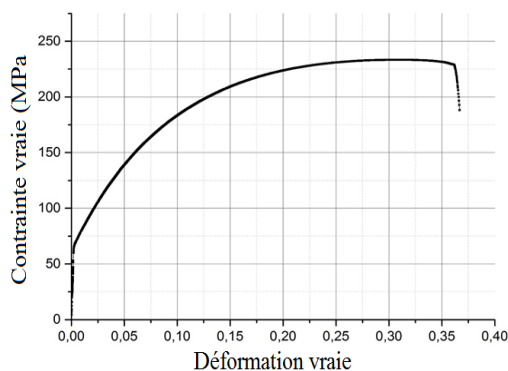
Où σ_y est la limite d'élasticité initiale, Q valeur de saturation de l'écrouissage isotrope, b est l'exposant de l'écrouissage.

2 Etude expérimentale

2.1 Caractérisation du matériau

Le matériau utilisé dans cette étude est une tôle d'alliage de cuivre monphasé (Cu-0.1Fe) avec une épaisseur initiale $e = 0.21$ mm. Le matériau subit à un traitement thermique de recuit de recristallisation à 400°C pendant 30 min [5].

Des essais de traction (à température ambiante et vitesse de déformation constante) sont réalisés afin de caractériser le comportement mécanique et l'anisotropie des tôles. Les résultats obtenus ainsi que les caractéristiques mécaniques de notre matériau sont résumées dans la figure suivante.



Propriétés mécaniques

Masse volumique ρ (g/mm ³)	8.92 E-9
Module de Young E (MPa)	128 000
Coefficient de Poisson ν	0.31
Limite élastique σ_y (MPa)	67

Figure.1. Résultats d'essai de traction

2.1 Essai de micro-formage incrémental

Un dispositif expérimental du formage incrémental « mono-point » (SPIF) est monté sur une fraiseuse verticale CNC 3 axes. Un dynamomètre 4 axes est utilisé pour mesurer les efforts de formage (figure 2). La lubrification (huile et eau) de l'interface tôle/outil a été utilisée pour réduire le frottement

et améliorer la formabilité des flans. Une forme pyramidale de la pièce finie est considérée et un outil de formage hémisphérique de rayon 1.9 mm a été utilisé. Il est animé d'une vitesse de rotation constante de 1000 tr/mn et déplace avec une vitesse d'avance constante de 300 mm/min.

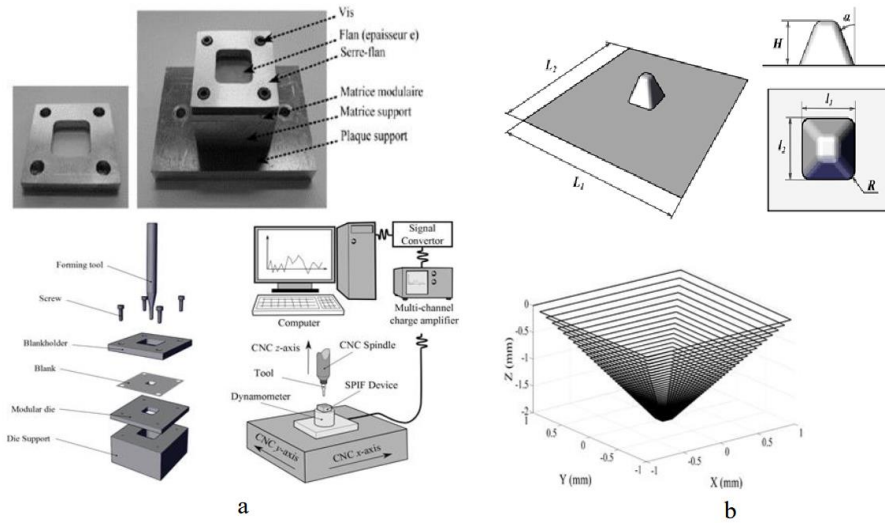


Figure.2. Essai de micro-formage incrémental: (a) dispositif expérimental, (b) géométrie et stratégie de formage

3 Etude numérique

Pour but la simulation numérique du procédé de μ -formage incrémental sous ABAQUS/Explicit, une représentation paramétrique du procédé a été programmée en langage MATLAB® [6], afin de :

- Créer un modèle paramétrique (maillage, conditions aux limites, chargement et conditions initiales, comportement des matériaux, interaction avec le code de simulation) ;
- Réaliser des simulations de micro-formage incrémental sous logiciel ABAQUS® ;
- Post-traiter les résultats (affichage du maillage déformé et les efforts de formage).

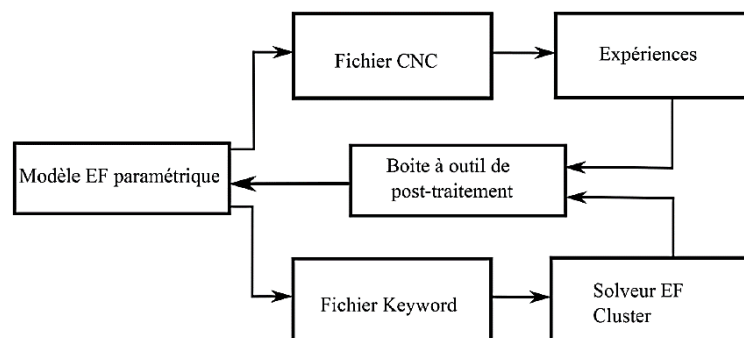


Figure.3. Boîte à outils numérique pour la simulation paramétrique de micro-SPIF

La méthode des éléments finis est choisie pour simuler le procédé, avec les mêmes données géométriques de l'étude expérimentale, on a utilisé des éléments solides à huit nœuds complètement intégrés (C3D8) pour le flan, le reste de l'outillage (Outil, Matrice, Serre Flan), avec des éléments coque rigide de type R3D4 (figure.4).

Les simulations ont été réalisées avec le logiciel ABAQUS® en utilisant 4 processeurs. Le temps de calcul total est de 15 heures par simulation. La comparaison numérique expérimentale pour l'évolution géométrique ainsi que pour l'effort de fonction du cycle de formage sont rapportés dans la figure.5.

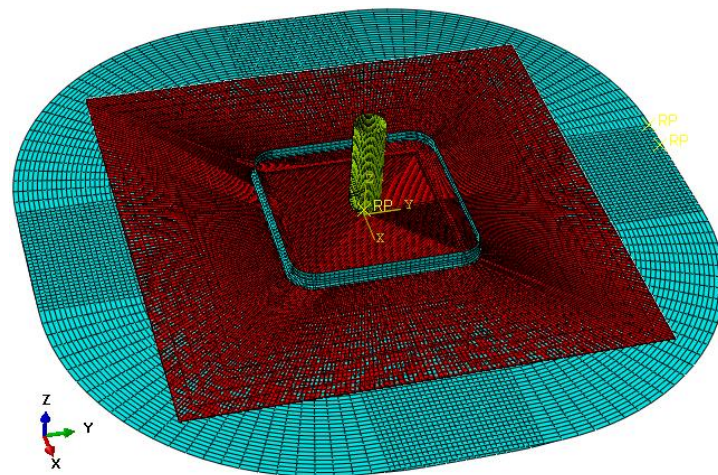


Figure.4. Modèle éléments finis complet

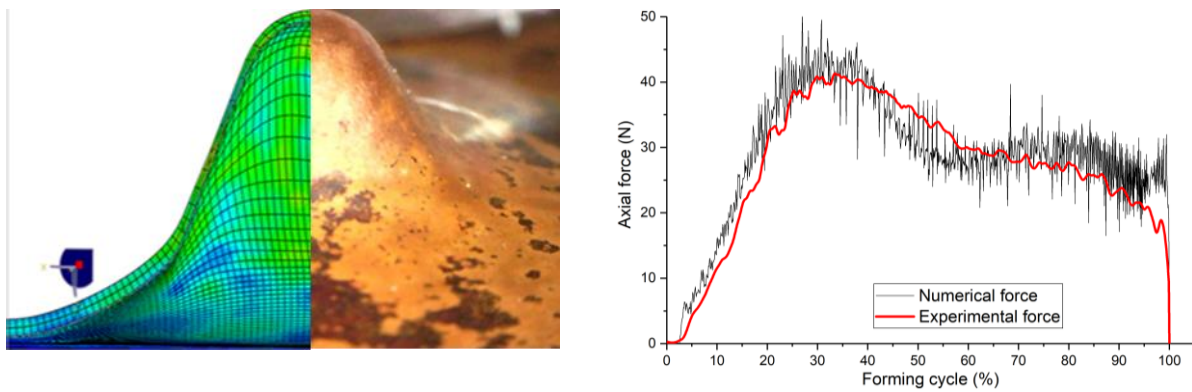


Figure.5. Comparaisons numérique expérimentale : Géométrie et effort de formage

4 Identification des paramètres

Pour l'identification des paramètres de modèle, on a utilisé la méthode inverse pour les résultats d'essai de traction et de micro-formage incrémental en terme d'effort selon l'axe Z, le principe est de minimiser l'écart entre l'effort expérimentale et numérique, en utilisant un algorithme d'optimisation de type levenberg-marquardt [6], figure.6.

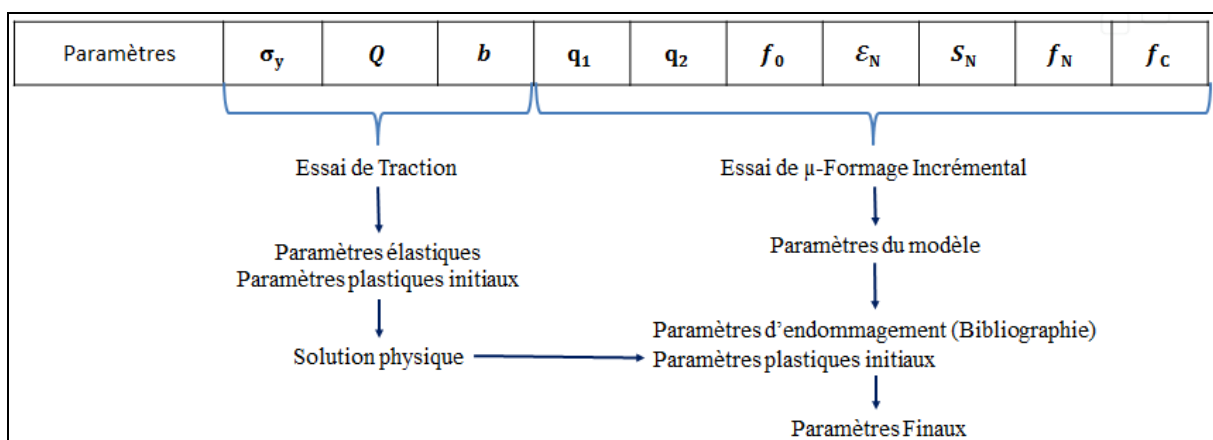


Figure.6. Principe d'identification des paramètres plastique et d'endommagement du modèle GTN

Le tableau suivant représente les premiers résultats d'identification obtenus pour les paramètres plastiques (loi de voce) et d'endommagement (modèle GTN).

	σ_y (MPa)	Q (MPa)	b	q_1	q_2	f_0	ϵ_N	S_N	f_N	f_c
Paramètres initiaux	66	177	27	1,26	1	9,96E-4	9,77E-2	6,07E-3	2,97E-3	3,8E-3
Paramètres finaux	65,8	177,4	30,34	1,25	1,168	1,23E-3	5,84E-2	5,68E-4	4,08E-3	2,49E-3

5 Résultats et conclusion

Les travaux rapportés ci-dessus ont démontré la capacité de prédire correctement le comportement des matériaux lors du processus de formage incrémental mono-point SPIF. Un modèle micromécanique GTN sous Abaqus/Explicit, est choisi pour la prédiction de l'endommagement et de la rupture ductile.

Une procédure de modélisation paramétrique par éléments finis basée sur la méthode inverse a été développée et couplée à des tests expérimentaux pour calibrer les paramètres du modèle d'endommagement GTN. L'identification des paramètres considérés est effectuée par la minimisation de l'écart entre l'essai et la modélisation des forces de formage par micro-SPIF. Les résultats obtenus lors des essais ont montré un bon accord avec les mesures expérimentales. Ainsi, les paramètres identifiés du modèle GTN sont efficaces pour caractériser l'évolution d'endommagement et la rupture ductile dans le procédé de micro-SPIF.

Références

- [1] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 54 (2005), p. 88-114.
- [2] A. L. Gurson, Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I-Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media, J. Eng. Mater. Technol 99 (1977), p. 2-15
- [3] V. Tvergaard, A. Needleman, Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, Acta Metallurgica, 32, p. 157-169 (1984)
- [4] Voce E (1955) A practical strain-hardening function. Metallurgica 51:219–226
- [5] R. Ben Hmida, S. Thibaud, A. Gilbin, F. Richard, Influence of the initial grain size in single point incremental forming process for thin sheets metal and micro parts: experimental investigations, Materials and Design, 45 (2012), p.155-165, 2012.
- [6] S. Thibaud, R. Ben Hmida, F. Richard, P. Malécot, A fully parametric toolbox for the simulation of single point incremental sheet forming process: Numerical feasibility and experimental validation, Simul. Model. Pract. Theory, vol. 29, p.32-43 (2012)