



HAL
open science

Travail des alliages de cuivre en feuilles : simulation et optimisation numérique 2D du procédé de découpe

Christophe Husson, Loïc Daridon, Saïd Ahzi

► To cite this version:

Christophe Husson, Loïc Daridon, Saïd Ahzi. Travail des alliages de cuivre en feuilles : simulation et optimisation numérique 2D du procédé de découpe. 17e Congrès Français de Mécanique, Aug 2005, Troyes, France. hal-00574986

HAL Id: hal-00574986

<https://hal.science/hal-00574986>

Submitted on 26 Apr 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.

Travail des alliages de cuivre en feuilles : simulation et optimisation numérique 2D du procédé de découpe

Christophe Husson, Loïc Daridon*, Saïd Ahzi

Institut de Mécanique des Fluides et des Solides, UMR 7507 Université Louis Pasteur - CNRS
4, Rue Boussingault - F 67000 STRASBOURG

*Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, UMR 5508 Université Montpellier II - CNRS
Place Eugène Bataillon - F 34095 MONTPELLIER

Résumé :

Résumé – Le développement de l'ingénierie simultanée dans les métiers de la mise en forme, comme la simulation numérique du procédé de découpe des matériaux métalliques en feuilles, a conduit à la réduction des coûts de fabrication tout en optimisant les propriétés et la fonctionnalité des pièces fabriquées. Pour les procédés, la vitesse de déformation et la température sont des paramètres influençant le comportement du matériau découpé. C'est pourquoi nous proposons de simuler le découpage de métaux en feuilles en utilisant un modèle de viscoplasticité prenant en compte l'évolution de la microstructure couplée à un modèle d'endommagement basé sur une approche thermodynamique des processus irréversibles. A l'aide de l'implémentation de nos modèles de comportement dans le code commercial d'éléments finis ABAQUS/Explicit, nous présentons une étude de l'influence du jeu de découpe et de l'usure des outils de découpe sur l'aspect du faciès de découpe et de l'évolution de la force de découpe. Cette étude est développée pour les alliages de cuivres.

Abstract :

Abstract – The development of concurrent engineering in the area of sheet metal forming, such as the numerical simulation of the blanking process of thin metallic sheets, have led to the fabrication cost reduction while optimizing the functional properties of the workpiece. In these processes, the strain rate and temperature are parameters that influence the behavior of the cost material. That is why we propose to simulate the blanking of thin metallic sheets using a viscoplastic model that accounts for the evolution of microstructure and coupled with a damage model based on thermodynamics of irreversible processes. By implementing our models in the commercial finite element code ABAQUS/Explicit, we propose to study the influence of the clearance and tool wear on the part edge and on the evolution of the cutting force. This analysis is conducted on copper alloys.

Mots clefs :

Découpe ; Tôles fines ; Simulation numérique ; Endommagement, Plasticité.

1 Lois de comportement

Afin de modéliser au mieux les opérations de mise en forme, pour des alliages cuivreux, il est nécessaire d'utiliser des lois de comportement qui prennent en compte aussi bien les effets de la vitesse de déformation et de la température que de l'évolution de la microstructure [1]. Dans cette étude numérique nous nous intéressons aux incidences macroscopiques des mécanismes d'écrouissage et d'endommagement. La formulation du couplage plasticité-endommagement est réalisée dans le cadre de l'écriture de la contrainte effective selon l'hypothèse de l'équivalence en énergie totale [6].

1.1 Modélisation du comportement viscoplastique

Comme étudié par Follansbee & Kocks [2], la contrainte d'écoulement est décomposée comme la somme d'une composante athermique σ_{ath} et d'une composante thermiquement activée. Ce modèle de plasticité prends en compte l'évolution de la microstructure (mouvement des dislocations) à l'aide de l'évolution d'une contrainte interne appelée contrainte mécanique seuil (MTS). La relation entre la contrainte d'écoulement et la contrainte MTS s'écrit :

$$\sigma_{eq}(\dot{p}, T, \text{microstructure}) = \sigma_{ath} + \hat{\sigma}_{th} \cdot S(\dot{p}, T, \text{microstructure}) \quad (1)$$

où T est la température et \dot{p} est la vitesse de déformation équivalente, $S(\dot{p}, T, \text{microstructure})$ rends compte de la cinématique de passage des obstacles par les dislocations en fonction de la température et de la vitesse de déformation [2] et $\hat{\sigma}_{th}$ est la composante thermiquement activée de la contrainte MTS. En nous inspirant des travaux de Kovács & Vörös [4] nous proposons la forme suivante [3] :

$$\hat{\sigma}_{th}(\dot{p}, T, \text{microstructure}) = \left[\sigma_{qs}(p) - \sigma_{ath} \right] R(\dot{p}, T) \quad (2)$$

où $R(\dot{p}, T)$ rends compte des mécanismes d'écrouissage dans le domaine des grandes vitesses de déformation (mécanismes de frottement visqueux) et $\sigma_{qs}(p)$ est la contrainte d'écoulement quasi-statique définie par Kovács & Vörös [4] afin de décrire le comportement des métaux polycristallins CFC :

$$\sigma_{qs}(p) - \sigma_{ath} = \sigma_{sm} \left[1 - \ln(p/p_m) \right] p \quad (3)$$

où p est la déformation plastique équivalente, σ_{sm} et p_m sont respectivement la contrainte et la déformation plastique équivalente correspondant à une densité de dislocations mobiles maximales [5].

1.2 Modélisation de la dégradation du matériau

Afin de modéliser la dégradation de la tôle, nous avons adopté l'approche de la thermodynamique des processus irréversible avec variables d'état. Nous abordons la dégradation du matériau au sens de Kachanov (1958) dans le cadre de l'équivalence en énergie totale [6]. Grâce à la théorie de l'endommagement continu nous proposons une loi d'évolution de la variable D valide sur une large plage de vitesse de déformation et de température [3] :

$$(D - D_i) = (D_{cr} - D_i) \left[\frac{\int_{p_{th}}^p \left[\sigma_{eq}(\dot{p}, T, \text{microstructure}) \right]^2 dp}{\int_{p_{th}}^{p_{cr}} \left[\sigma_{eq}(\dot{p}, T, \text{microstructure}) \right]^2 dp} \right]^K \quad \text{si } p_{th} \leq p \leq p_{cr} \quad (4)$$

où D_i est l'endommagement initial, D_{cr} est l'endommagement à rupture, p_{th} et p_{cr} sont respectivement la déformation équivalente seuil et la déformation équivalente à rupture. Ces deux quantités dépendent explicitement de la vitesse de déformation, de la température et du taux de tri-axialité des contraintes, données par [3] :

$$p_{cr} \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}, \dot{p}, T \right) = \varepsilon_{th}(\dot{p}, T) \left[\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{th}} \right]^{1/f} \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right) \quad \text{et} \quad p_{th} \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}, \dot{p}, T \right) = \varepsilon_{th}(\dot{p}, T) \left[\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{th}} \right]^{1/f} \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right)^{-1} \quad (5)$$

où $\varepsilon_{th}(\dot{p}, T)$ est la déformation seuil d'un état unidimensionnel en fonction de la vitesse de déformation et de la température [3], ε_{cr} et ε_{th} sont respectivement la déformation seuil et la déformation à rupture unidimensionnelles quasi-statiques et σ_H/σ_{eq} est le taux de tri-axialité des contraintes (σ_H est la contrainte hydrostatique).

2 Analyse par éléments finis du procédé de découpe

La qualité du profil de découpe d'une tôle dépend principalement du jeu de découpe (noté J) d'une part, et de l'usure du poinçon et de la matrice d'autre part. Nous présentons ici une étude numérique par éléments finis montrant l'influence de ces paramètres process sur la géométrie finale du profil de découpe (figure 2a) et sur la courbe d'évolution de la force de découpe en fonction de la pénétration. Le matériau découpé est une tôle de bronze à base d'étain d'épaisseur inférieure à 1 mm.

Dans nos simulations la tôle est modélisée par un solide déformable. Nous utilisons les lois de comportement proposées précédemment implémentées à l'aide d'une subroutine utilisateur (VUMAT) dans le code de calcul ABAQUS/Explicit (version 6.4). Pour la tôle, le maillage est constitué d'éléments 2D quadrangles à déformation plane à intégration réduite (CPE4R). Le poinçon, le serre-flan et la matrice sont quant à eux modélisés comme des corps analytiques rigides. La fissure est créée par suppression d'éléments totalement endommagés (fonction « element deletion »).

Au cours de la découpe, les outils (poinçon et matrice) subissent des sollicitations sévères conduisant à l'usure progressive de leurs parties actives créant ainsi un rayon de courbure. Afin d'étudier le phénomène d'usure nous le modélisons par une variation des rayons de courbure des outils (respectivement notés R_p pour le poinçon et R_d pour la matrice).

2.1 Etude du profil de découpe

La figure 1 montre l'influence de l'usure du poinçon et de la matrice sur le profil de découpe pour un jeu de faible ($15 \mu\text{m}$) et pour un jeu important ($60 \mu\text{m}$). Il apparaît qu'un jeu de découpe important provoque une zone bombée, une zone cisailée et un angle à rupture plus marqués (figures 1a-1c et 1b-1d). De même, d'autres études numériques sur la courbe d'évolution de l'effort de découpe, nous ont permis de constater un adoucissement de la propagation des fissures. La phase de rupture de la tôle est moins « brutale ». Fort de ces constats, nous pouvons en conclure qu'un jeu excessif provoque une mauvaise qualité du produit découpé.

L'accroissement de l'usure des outils de découpe provoque une augmentation de la zone bombée, de la zone cisailée, de la bavure, de l'angle à rupture ainsi qu'une diminution de la zone arrachée (figures 1a-1b et 1c-1d). En effet, au cours du découpage, l'essentiel des sollicitations se fait sur une bande de matière dont la largeur correspond au jeu réel (jeu J + rayons d'usure des outils). A savoir, plus la largeur de cette bande est faible, plus le cisaillement de la matière est favorisée (et inversement).

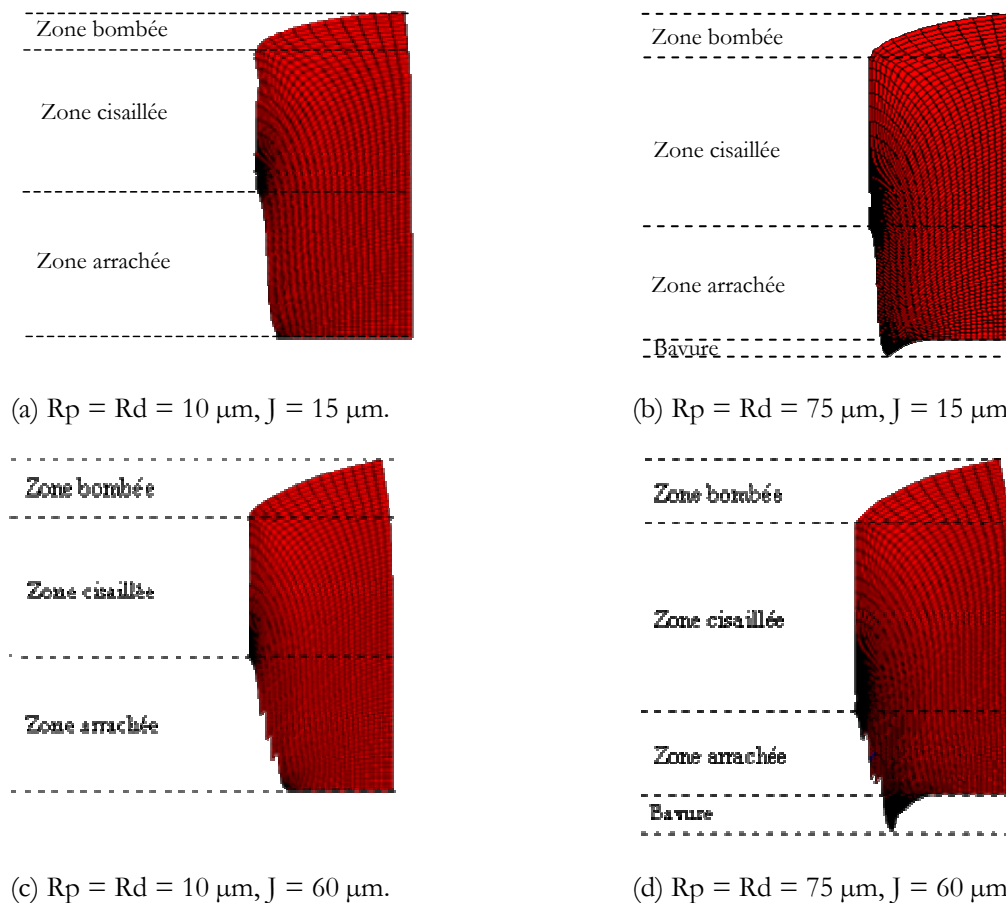


FIG. 1 – Influence de l'usure du poinçon et de la matrice et du jeu de découpe sur le profil de découpe.

2.2 Etude de la force de découpe en fonction de la pénétration à rupture

L'instrumentation d'un poinçon de découpe nous a permis de déterminer expérimentalement l'évolution de l'effort de découpe en fonction du déplacement du coulisseau (poinçon). Cette étude a été complétée par une analyse au microscope électronique à balayage des pièces découpées afin de quantifier les diverses hauteurs caractéristiques du profil de découpe. Pour des raisons de confidentialité industrielle, les résultats présentés sont normalisés et les valeurs des paramètres des modèles non dévoilées. La figure 2b montre l'évolution de l'effort de découpe pour un jeu J de $15 \mu\text{m}$ (jeu poinçon - serre flan de $5 \mu\text{m}$) et un rayon de courbure du poinçon et de la matrice de $10 \mu\text{m}$ représentatif d'outils parfaitement affûtés. La cadence de découpe est d'environ 700 coups / minute. Sur la figure 2b, nous pouvons constater que l'évolution numérique de l'effort de découpage est en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Sur la figure 2b, on peut distinguer les différentes étapes du procédé de découpe : comportement élastique (non visible), comportement plastique ❶ (zone bombée du profil de découpe, figure 2a), cisaillement et endommagement du matériau ❷ (zone cisailée du profil de découpe, figure 2a), puis initiation et propagation des fissures conduisant à la rupture totale ❸ (zone arrachée, angle de rupture et bavure du profil de découpe, figure 2a).

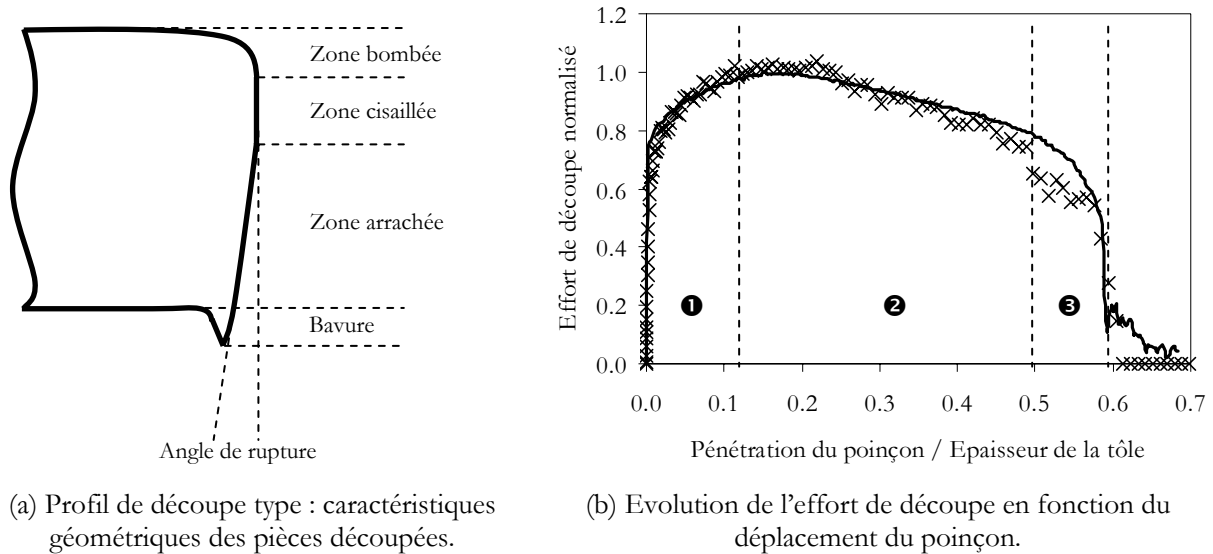


FIG. 2 – Courbe d'évolution de l'effort de découpe normalisé en fonction de la pénétration du poinçon normalisée : comparaison entre les résultats numériques obtenus (x) et les résultats expérimentaux (-).

3 Optimisation du procédé de découpe : application à un cas d'étude

Au cours de notre étude numérique nous avons établi des équations empiriques d'évolution des hauteurs caractéristiques du profil de découpe en fonction du jeu de découpe J d'une part et du rayon de courbure du poinçon et de la matrice. A l'aide de ces dernières considérations, nous pouvons réécrire les équations de l'angle à rupture Ar et de l'angle à rupture optimum θ proposés par [7] en tenant compte de J , R_p et R_m :

$$Ar(J, R_p, R_m) = \arctg\left(\frac{J}{Ha(J, R_p, R_m)}\right) \text{ et } \theta(J, R_p, R_m) = \arctg\left(\frac{J}{t - \Delta(J, R_p, R_m) + R_p + R_m}\right) \quad (6)$$

où t est l'épaisseur de la tôle, $Ha(J, R_p, R_m)$ et $\Delta(J, R_p, R_m)$ sont respectivement les équations empiriques d'évolution de la hauteur de la zone arrachée et de la pénétration à rupture en fonction du jeu et de l'usure des outils de découpe. Afin d'obtenir un profil de découpe optimal, il convient de faire correspondre l'angle de rupture du profil Ar avec l'angle de rupture optimum θ : $Ar - \theta = 0$.

La figure 3 présente le profil de découpe optimisé expérimentalement (3b) et le profil obtenu numériquement (3a) à l'aide du critère d'optimisation proposé précédemment. Les hauteurs caractéristiques obtenues sont en bon accord avec les résultats expérimentaux (tableau 1).

aspect du profil de découpe	hauteur de la zone bombée	hauteur de la zone cisailée	hauteur de la zone arrachée	angle de rupture
résultats expérimentaux / résultats numériques	86%	108%	98%	60%

TAB. 1 – Comparaison entre les résultats numériques obtenus et les résultats expérimentaux.

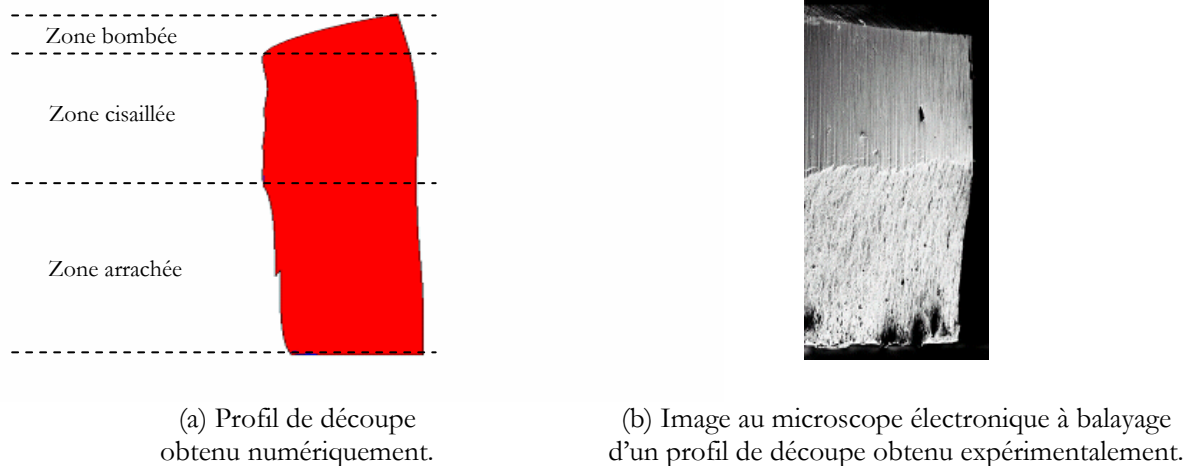


FIG. 3 – Profil de découpe pour un jeu J de $30\ \mu\text{m}$ et pour des outils de découpe neufs : comparaison entre les résultats expérimentaux (b) et les résultats numériques.

4 Conclusion

La simulation du procédé de découpe d'alliages de cuivre en feuilles est réalisée à l'aide d'un modèle de viscoplasticité prenant en compte l'évolution de la microstructure d'une part, et d'un modèle d'endommagement basé sur la théorie de l'endommagement continu d'autre part. Les résultats numériques obtenus montrent un bon accord avec les résultats expérimentaux, aussi bien pour les profils de découpe que pour l'évolution de la force de découpe.

Références

- [1] Poizat C., Campagne L., Daridon L., Ahzi S., Husson C. & Merle L. Modeling and simulation of thin sheet blanking using damage and rupture criteria. *Int. J. of Forming Processes*, à paraître, 20 p. (2005).
- [2] Follansbee P.S. & Kocks U.F., A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable. *Acta Metall.*, Vol. 36, pp. 81-93 (1988).
- [3] Husson Ch. Simulation numérique de la mise en forme des tôles métalliques appliquées à la connectique : étude de la découpe. Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur, 270 p (2004).
- [4] Kovács I. & Vörös G., On the mathematical description of the tensile stress-strain curves of polycrystalline face centered cubic metals. *Int. J. of Plast.*, Vol. 12, N. 1, pp. 35-43 (1996).
- [5] Flinn J.E., Field D.P., Korth G.E., Lillo T.M. & Macheret J. The flow stress behavior of OFHC polycrystalline copper. *Acta Metall.*, Vol. 36, N. 1, pp. 81-93 (1988).
- [6] Saanouni K., Nesnas K. & Hammi Y. On the elastic flow with damage. *Int. J. of Damage Mechanics*, Vol. 3, N. 3, pp. 140-169 (1994).
- [7] Faura F., Garcia A. & Estrems M. Finite element analysis of optimum clearance in the blanking process. *J. of Mat. Proc. Tech.*, Vol. 80-81, pp. 121-125 (1998).