



**HAL**  
open science

## Travail des métaux en feuilles Simulation numérique 2D du découpage d'alliages de cuivre

Christophe Husson, Christophe Poizat, Loïc Daridon, Saïd Ahzi

► **To cite this version:**

Christophe Husson, Christophe Poizat, Loïc Daridon, Saïd Ahzi. Travail des métaux en feuilles Simulation numérique 2D du découpage d'alliages de cuivre. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01812963

**HAL Id: hal-01812963**

**<https://hal.science/hal-01812963>**

Submitted on 12 Jun 2018

**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.

Public Domain

---

# Travail des métaux en feuilles

## Simulation numérique 2D du découpage d'alliages de cuivre

**Christophe Husson\*** — **Christophe Poizat\*\*** — **Loïc Daridon\*\*\***  
— **Saïd Ahzi\***

*\* Institut de Mécanique des Fluides et des Solides  
UMR 7507, Université Louis Pasteur / CNRS  
4 rue Boussingault, F-67000 Strasbourg  
ahzi@imfs.u-strasbg.fr*

*\*\* Fraunhofer Institute for Mechanics of Materials IWM  
Wöhlerstrasse 11, D-79108 Freiburg i. Br.*

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

---

*RÉSUMÉ. Le comportement mécanique sous sollicitation dynamique des matériaux est sensible à un certain nombre de paramètres comme la température et la vitesse de déformation. Dans notre étude, deux approches sont suivies afin d'appréhender le comportement et la rupture d'un alliage de cuivre au cours d'une opération de découpe : une approche mécanistique et une approche phénoménologique. Les résultats obtenus par simulations numériques sont comparés avec des résultats expérimentaux. Une étude de l'influence des paramètres procédés est présentée.*

*ABSTRACT. The dynamic behaviour of metals involves temperature and strain rate effects. In this contribution, two approaches are presented. The first one is based on mecanistical considerations whereas the second one is derived in the classical thermodynamical framework. They both attempt to describe the viscoplastic and damage behaviour of an industrial copper alloy during thin sheet blanking. The numerical results are compared with experimental results. Results from a parametric studies are presented.*

*MOTS-CLÉS : découpe, simulation par éléments finis, alliages de cuivre*

*KEYWORDS: blanking, finite element simulation, copper alloys*

---

## 1. Introduction

Lors du procédé de découpe de tôle, différents paramètres comme la cadence de découpe, le matériau et l'épaisseur, influencent la création et les caractéristiques d'une bande de cisaillement. Il est clairement établi que la qualité de découpe dépend des dimensions de cette bande de localisation. Dans le cas des cadences élevées on observe, notamment, dans cette zone de localisation des vitesses de déformation de plusieurs centaines de  $s^{-1}$  qui induisent une augmentation importante de la température (Kalpakjian, 1997). Or, pour un industriel, il est important de pouvoir prédire les conséquences d'un changement de matériau ou de cadences sur la qualité de la découpe. Dans le domaine de la connectique par exemple, où de nombreux alliages de cuivres sont utilisés, l'optimisation du couple procédé-matériau par une méthode essai-erreur est très coûteuse en terme de rapport qualité-prix. Aussi, une meilleure compréhension des mécanismes en jeu au cœur du matériau lors de la découpe doit permettre de mettre en place un outil d'optimisation du couple procédé-matériau performant. En d'autres termes, une modélisation appropriée du comportement du matériau est nécessaire pour déterminer dans quelle mesure tel paramètre matériau va induire tel changement sur le procédé et le produit final. Dans cette contribution, nous présentons deux approches complémentaires, l'une dite mécanistique, l'autre dite thermodynamique. Les deux modèles prennent en compte les effets de vitesses de déformation et de température, sur le comportement plastique et sur l'endommagement et cela sur une grande plage de vitesse de déformation. Cette caractéristique des modèles est nécessaire quand on souhaite simuler la découpe de métaux en feuille mince. Le matériau considéré est un alliage de cuivre industriel. Dans la première approche, nous utilisons un modèle de plasticité de type mécanistique rendant compte du mouvement des dislocations (modèle MTS de Follansbee et al., 1988) associé à un modèle d'endommagement de même nature que le modèle viscoplastique basé sur la germination et la croissance de cavités (modèle NAG de Campagne et al., 2004). Dans la deuxième approche, nous utilisons un modèle de plasticité prenant en compte l'évolution de la microstructure (modèle KVm de Husson, 2004) est couplé à un modèle d'endommagement dynamique développé dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles (modèle MED de Husson, 2004).

Par ailleurs, au cours du procédé de découpe, le poinçon et la matrice subissent des sollicitations sévères induisant une usure progressive des parties actives, créant ainsi un rayon de courbure des outils de découpe (poinçon et matrice). Le jeu de découpe est un paramètre process important car il exerce une action directe sur l'aspect de la pièce découpée. Une étude numérique de l'influence de ces paramètres sur l'aspect du profil de découpe et sur la courbe effort de découpe est présentée. Les résultats obtenus pour un cuivre CuSn5 sont comparés avec des résultats expérimentaux.

## 2. Lois de comportement

### 2.1. Couplage *KVm* / *MED*

#### 2.1.1. *Modèle de plasticité Kovacs et Vörös modifié : Kv<sub>m</sub>*

Comme étudié par Follansbee et al. (1988) la contrainte d'écoulement est décomposée comme la somme d'une composante athermique et d'une composante thermiquement activées. Cette dernière s'exprime en fonction de l'expression de la contrainte d'écoulement quasi-statique de Kovacs et al. (1996) permettant de décrire le comportement des métaux polycristallins cubiques faces centrées. Ce modèle est valide sur une large plage de vitesse de déformation de  $10^{-4}$  à  $10^{+4}$  s<sup>-1</sup> et de température de 76 K à moitié de la température de fusion (Husson 2004). Le modèle rends compte de la cinématique de passage des obstacles par les dislocations en fonction de la température et de la vitesse de déformation (Follansbee et al., 1988) d'une part, et des mécanismes d'écrouissage dans le domaine des mécanismes de frottement visqueux (Husson, 2004) d'autre part. L'évolution de la microstructure est prise en compte au travers d'une contrainte interne appelée contrainte mécanique seuil (Mechanical Threshold Stress, notée MTS). La relation entre la contrainte d'écoulement et la contrainte MTS est basée selon une expression phénoménologique comme proposée par Husson (2004).

#### 2.1.2. *Modèle d'endommagement dynamique : MED*

L'évolution de la dégradation du matériau est basée sur la mécanique des milieux continus dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles. A l'aide d'une nouvelle forme du potentiel de dissipation ductile d'endommagement (Husson, 2004), la loi de normalité généralisée nous permet d'écrire la loi d'endommagement suivante, loi valide sur une large plage de vitesse de déformation ( $10^{-4}$  à  $10^{+4}$  s<sup>-1</sup>) et de température (de 76 K à moitié de la température de fusion). L'évolution de l'endommagement s'exprime en fonction des déformations équivalentes seuil et à rupture dépendant de la vitesse de déformation, de la température et du taux de triaxialité des contraintes comme proposées par Husson (2004). L'évolution de l'endommagement dépend de son état initial, de son état à rupture et s'exprime en fonction d'un coefficient de non-linéarité.

### 2.2. Couplage *MTS* / *NAG*

#### 2.2.1. *Modèle de plasticité MTS*

Le modèle MTS (Follansbee et al., 1988) donne l'évolution de la contrainte d'écoulement sur une grande plage de vitesse de déformation (de  $10^{-3}$  /s à  $10^{+4}$  /s) prenant en compte l'évolution de la microstructure (mouvement des dislocations) au travers d'une contrainte interne appelée contrainte mécanique seuil. La formulation générale est associée à des équations donnant l'évolution de l'écrouissage d'une part, et d'une contrainte de saturation d'autre part.

### 2.2.2. Modèle d'endommagement « nucleation and growth » : NAG

Le modèle NAG, de type mécanistique, rend compte de la nucléation et la croissance de cavités sphériques sous sollicitations dynamiques. En s'appuyant sur les travaux de Hanim et al. (2000), une nouvelle expression du volume total de cavités a été dérivée par Campagne et al. (2003). Cette expression exprime le volume relatif total de cavités comme la somme du volume initial de cavités présentes dans le matériau, du volume relatif de vides créés (prenant en considération les cas de faibles et forts taux de triaxialité) et du volume de croissance.

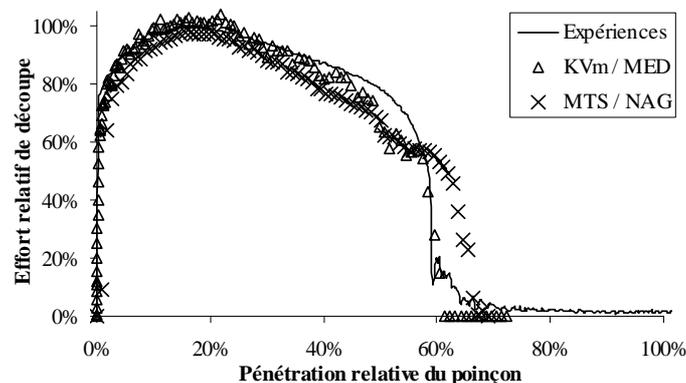
## 3. Simulation numérique 2D du procédé de découpe d'alliages de cuivre

### 3.1. Considérations numériques

Les modèles présentés ci-dessus ont été implémentés dans le code de calcul ABAQUS/Explicit. Les simulations ont été réalisées pour une tôle d'alliage de cuivre d'épaisseur 0.58 mm à une cadence 1000 coups/min. Dans nos simulations le poinçon, la matrice et le serre-flan sont des corps rigides. Pour le maillage de la tôle nous avons utilisés des éléments quadrangles à déformations planes.

### 3.2. Comparaison avec les données expérimentales

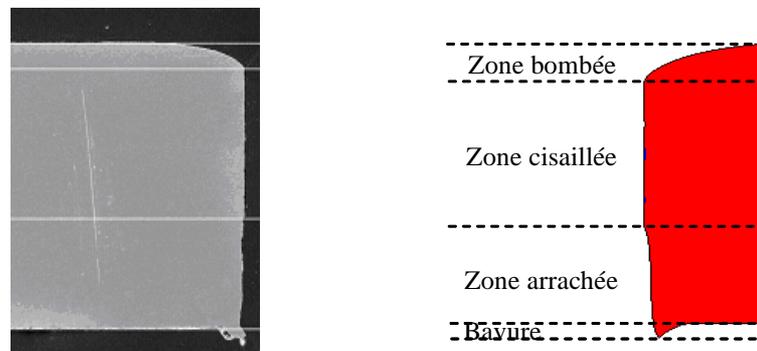
La figure 1 présente une comparaison des résultats numériques obtenus à l'aide des modèles MTS / NAG et KVm / MED avec les résultats expérimentaux.



**Figure 1.** Courbe effort de découpe en fonction de la pénétration du poinçon : comparaison entre les résultats numériques obtenus avec le modèle MTS / NAG, le modèle KVm / MED et les résultats expérimentaux.

Les résultats numériques obtenus avec les deux approches considérées sont en bon accord avec les résultats expérimentaux pour un jeu de découpe de  $15\ \mu\text{m}$  et pour des rayons de courbure des outils de découpe (poinçon et matrice) de  $10\ \mu\text{m}$ . La difficulté expérimentale de détermination de certains paramètres du modèle MTS / NAG nous ont conduit à utiliser le modèle KVm / MED dans une approche purement industrielle. Une application plus détaillée du modèle MTS / NAG se trouve dans Poizat et al. (2005).

La comparaison des résultats numériques obtenus (modèle KVm / MED) avec le profil de découpe expérimental montre une bonne adéquation (figure 2) pour un jeu de découpe de  $15\ \mu\text{m}$  et pour des outils de découpe usés. Le tableau 1 présente une comparaison des résultats numériques avec les résultats expérimentaux sur l'aspect du profil de découpe.



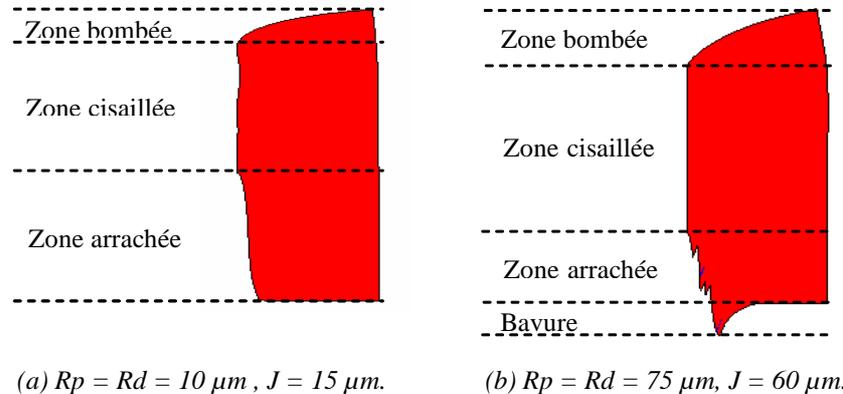
**Figure 2.** Profil de découpe pour un jeu de découpe de  $15\ \mu\text{m}$  et pour un rayon de courbure du poinçon et de la matrice de  $60\ \mu\text{m}$  : comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques.

Hauteurs caractéristiques du profil de découpe	zone bombée	zone cisailée	zone arrachée	bavure	angle de rupture
Comp. num. / exp.	151%	98%	92%	84%	60%

**Tableau 1.** Caractéristiques géométriques des pièces découpées pour un jeu de découpe de  $15\ \mu\text{m}$  et pour des outils de découpe usés : comparaison entre les résultats numériques obtenus et les résultats expérimentaux.

### 3.3. Etude de l'influence des paramètres process

La figure 3 montre l'influence de l'usure du poinçon et de la matrice et du jeu de découpe sur le profil de rupture. Il apparaît que l'usure favorise l'apparition de bavure et que l'augmentation du jeu de découpe provoque une augmentation de l'angle de rupture et de la zone cisailée.



**Figure 3.** Influence du rayon de courbure du poinçon et de la matrice (resp.  $R_p$  et  $R_m$ ) et du jeu de découpe  $J$  sur le profil de découpe obtenu numériquement.

## 5. Conclusion

Deux approches permettant de modéliser le comportement élasto-viscoplastique jusqu'à endommagement et ruine de structures sur une grande gamme de vitesse de déformation et de température ont été présentées : une première dite mécanistique, ainsi qu'une deuxième établie dans un cadre thermodynamique. Dans le cas de la simulation numérique du découpage de tôle, les deux approches donnent des résultats en bonne adéquation avec les observations expérimentales (profil de découpe et courbe d'évolution de l'effort de découpe).

## 6. Bibliographie

- Campagne L., Daridon L., Ahzi S., *A physically based model for dynamic failure in ductile metals*. Mechanics of Materials, 2004, A paraître.
- 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. 1, 1988, p. 81-93.
- Hanim S., et Ahzi S., *A unified approach for pressure and temperature effects in dynamic failure criteria*, International Journal of Plasticity, vol. 17, n° 9, 2000, p. 1215-1244.
- Husson Ch., *Simulation numérique de la mise en forme des tôles métalliques appliquées à la connectique : étude de la découpe*, Thèse de doctorat, Université Strasbourg 1, 2004.
- Kovacs I., Vörös G., *On the mathematical description of the tensile stress-strain curves of polycrystalline face centered cubic metals*. Pr. Phy. Soc. Lon., vol. 62b, 1996, p. 676-700.
- Poizat C., Campagne L., Daridon L., Ahzi S., Husson Ch., Merle L., *Modeling and simulation of thin sheet blanking using damage and rupture criteria*. Int. J. of Form. Proc., vol. 9, n° 20, 2005. Sous presse.