

Découpage de tôle en alliage de cuivre : expérience et simulation

A. LAGROUM^a, S. THUILLIER^a, P.Y. MANACH^a

a. Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France -
amine.lagroum@univ-ubs.fr

Résumé :

Le découpage mécanique de tôles en alliage de cuivre, d'épaisseur variant entre quelques dixièmes de millimètres jusqu'au millimètre, est un procédé répandu dans l'industrie électronique. Le cahier des charges impose des cadences de production de plus en plus élevées et des tolérances dimensionnelles assez strictes sur les pièces découpées, ce qui demande une maîtrise fine du procédé de découpage. La conception des outils de découpe s'appuie essentiellement sur des règles métier empiriques et le savoir-faire des opérateurs. La volonté des découpeurs d'intégrer la simulation lors de la conception des outils reste récente ; l'objectif est d'anticiper les problèmes de production comme la rupture ou le non-respect des tolérances dimensionnelles en fonction du matériau utilisé. L'objectif de cet article est la prédiction numérique de l'effort maximal de découpe et la qualité du bord découpé. Pour cela, la découpe d'un bord rectangulaire en conditions industrielles a été instrumentée et réalisée sur un grand nombre de cycles. Le bord découpé est observé par microscopie électronique à balayage. Dans un premier temps, un modèle numérique 2D en déformations planes est développé et une comparaison expérience/modèle est présentée.

Abstract :

Fine blanking of copper alloy thin sheet, with thickness ranging from a few tenths of millimeters to one millimeter, is a widespread process in the electronics industry. Specifications require higher and higher production rates and severe dimensional tolerances on blanked parts, which requires a fine control of the blanking process. The design of cutting tools is essentially based on empirical rules and the know-how of the operators. The willingness to integrate numerical simulation in tool design remains recent; the objective is to anticipate production problems such as non-compliance with dimensional tolerances depending on the material used. The aim of this paper is the numerical prediction of the maximum blanking load and the cut edge quality. Blanking of a rectangular contour in industrial conditions is considered for a large number of cycles and the load is recorded. The cut edge is observed by scanning electron microscopy. Then, as a first step, a 2D plane strain finite element model is developed and a comparison between experiments and simulation is presented.

Mots clefs : découpage, tôle mince, alliage de cuivre, simulation numérique

1 Introduction

Dans le secteur de l'électronique, différents types de pièces sont utilisés, comme par exemple des composants électroniques (puces) dotés de connecteurs, des supports métalliques (ou leadframe) sur lesquels les puces sont assemblées, ou des éléments d'interconnexion. Ces constituants ont souvent une partie métallique, réalisée en cuivre pur (99,9%) ou en alliage (ajout de zinc, d'étain ou de fer dans le cuivre) afin d'assurer une bonne tenue mécanique et une conduction thermique et électrique [1], qui est ensuite encapsulée dans une résine. Cette partie métallique est obtenue suite à une mise en forme multi-étapes de découpage et cambrage, réalisée avec des outils à suivre [2]. Cette étude s'intéresse à une étape de découpage.

Des études expérimentales sur le découpage d'alliage de cuivre ont été menées par différents auteurs au cours de ces dernières années. Meunier [3] a étudié l'influence des paramètres technologiques de découpe (cadence, jeu poinçon-matrice etc.) sur l'effort de découpe et les profils des bords découpés. Pour cela, il a proposé un outil permettant de découper une forme carrée sur presse. Lemiale [4] propose un outil permettant de découper une forme rectangulaire en conditions quasi-statiques. Subramonian et al. [5] travaillent avec un outil permettant la découpe d'une forme circulaire en bronze (CuSn4) afin d'étudier l'influence des vitesses de découpe élevées (1600 mm/s) sur la réponse en effort. Lors du découpage à grande vitesse, l'effet de la vitesse de déformation a pour conséquence une augmentation locale de la température qui résulte de l'échauffement adiabatique produit par déformation plastique [4, 6, 7]. Il existe peu d'études portant sur la mesure de l'échauffement lors du découpage. Demmel et al. [8] mesurent une augmentation de température allant jusqu'à 300 °C lors de la découpe d'une tôle en acier S355MC de 6 mm d'épaisseur à une vitesse de découpe de 70 mm/s. Gréban et al. [9] ont étudié l'influence de la microstructure de différents alliages de cuivre sur la qualité du bord découpé d'une connexion de type enfichage. Le bord découpé est caractérisé par une zone bombée, cisailée, arrachée et une bavure. Gréban et al. définissent la qualité du bord découpé optimale comme étant le profil ayant une proportion de zone cisailée la plus importante. Le profil de la forme cisailée est celle qui se rapproche le plus de la forme à découper.

Les modèles numériques de découpe sont fréquemment simplifiés en problème 2D axisymétrique ou 2D déformations planes. Subramonian et al. [5] proposent un modèle 2D axisymétrique pour le découpage d'un bronze (CuSn4) avec le logiciel éléments finis DEFORM 2D. Des modèles 2D déformations planes du découpage d'alliage de cuivre ont été proposés avec le logiciel éléments finis BlankForm [4, 6] ainsi qu'avec Abaqus/Explicit [10, 11]. Il est à constater que dans la littérature, il existe très peu d'instrumentation de procédé industriel du découpage. De même, les industriels manifestent leur intérêt pour la simulation du procédé de découpe multi-étapes. Les pièces découpées ayant des géométries relativement complexes, une modélisation 3D de découpage paraît nécessaire, ce qui constitue l'objectif à long terme de ces travaux.

Dans cette étude, une instrumentation en effort et déplacement d'un outil industriel permet de caractériser le comportement de l'alliage de cuivre dans les conditions réelles du procédé. La forme découpée consiste en un contour fermé rectangulaire à coins arrondis. Les zones caractéristiques du profil des bords découpés (zones bombée, cisailée, arrachée) sont mesurées à partir d'images obtenues au microscope électronique à balayage. Par la suite, un modèle numérique d'un découpage 2D d'un bord droit, en déformations planes, est développé avec Abaqus/Explicit, afin de prédire la force maximale de découpe. Les simulations sont stoppées avant l'amorçage de la rupture. Finalement, des comparaisons entre les données expérimentales et numériques sont menées, en termes de courbe d'effort et de bord découpé.

2 Procédure expérimentale

Le découpage est réalisé à l'aide d'un outil à suivre industriel qui permet de fabriquer une pièce destinée à l'industrie électronique. Ce dernier comporte autant de poinçons qu'il y a d'étapes de découpe. Sur la dizaine de poinçons que comporte l'outil, un poinçon a été choisi pour sa géométrie ainsi que pour des raisons d'accessibilité et d'encombrement. L'instrumentation de l'outil en effort et déplacement porte sur une étape consistant à découper une forme rectangulaire à coins arrondis. A noter que la forme rectangulaire découpée correspond au déchet, aussi appelé débouchure, et que la qualité du bord découpé s'apprécie sur la zone extérieure. Cette étude s'intéresse au bord découpé sur la tôle qui constitue la partie fonctionnelle des pièces issues du découpage (figure 1a). Son originalité est l'instrumentation directe d'un outil de production, qui permet de réaliser des mesures en conditions réelles. L'objectif est d'avoir des informations sur l'effort de découpe, ainsi que sur la forme des bords découpés. Le dispositif expérimental utilisé ne permet pas de mesurer l'échauffement de la tôle lors du découpage.

2.1 Matériau

Le matériau étudié est un cuivre pur à 99,9% (Cua1) d'épaisseur 0,8 mm. Ce dernier est utilisé dans l'industrie électronique pour ses propriétés mécaniques ainsi que sa bonne conduction électrique et thermique.

Le comportement du cuivre est caractérisé à partir d'un essai de traction, réalisé dans la direction de laminage, à température ambiante et pour une vitesse de déformation de l'ordre de $10^{-3} s^{-1}$. Il est à noter que la loi de comportement ne tient pas compte des vitesses de déformation rencontrées en découpage qui sont de l'ordre de $200 s^{-1}$. Pour les besoins de la simulation numérique, l'érouissage isotrope du cuivre est décrit par les données discrètes de l'évolution de la contrainte de Cauchy en fonction de la déformation plastique issues de l'essai de traction, extrapolées de façon linéaire aux très grandes déformations. Les propriétés physiques et mécaniques du cuivre Cua1 sont listées dans le tableau 1.

TABLEAU 1 – Propriétés physiques et mécaniques du cuivre Cua1 (le module d'Young E , la limite élastique de la loi d'érouissage σ_0 , R_m et $R_{p0,2\%}$ sont des valeurs mesurées à partir de l'essai de traction, le coefficient de Poisson ν provient d'un cuivre pur dans [12], la masse volumique ρ est une donnée fournisseur)

ρ (kg/m ³)	E (GPa)	ν	σ_0 (MPa)	$R_{p0,2\%}$ (MPa)	R_m (MPa)
8900	89,5	0,28	221,0	275,0	284,0

2.2 Essais de découpe

Les essais sont conduits en conditions industrielles avec une presse mécanique Bruderer de capacité 500 kN et une lubrification est utilisée. L'outil de découpe comporte plusieurs poinçons, dont un seul est instrumenté. Le schéma du dispositif de découpe avec le poinçon de l'étude est représenté sur la figure 1b. L'outil de découpe présente un bloc supérieur sur lequel est fixé le poinçon. Le dévêtisseur permet d'appliquer un effort serre-flan sur la tôle par le biais de ressorts lors de la découpe. La tôle est posée sur le bloc inférieur qui comporte la matrice. Le mouvement vertical du bloc supérieur entraîne le serrage de la tôle entre le dévêtisseur et la matrice avant d'entraîner le découpage de la tôle par le mouvement du poinçon.

L'effort de découpe est mesuré à l'aide d'un capteur piézoélectrique (HBM CFW 50kN). Le déplacement du poinçon est mesuré par le biais d'un capteur inductif à noyau libre (Solartron AX/10/S). L'acquisition

est faite avec un boîtier HBM QuantumX MX840A à une fréquence d'échantillonnage de 19,2 kHz. Les essais sont conduits à la cadence standard du procédé industriel qui est de 200 coups/min, elle correspond à une vitesse de découpe de 168 mm/s. 650 événements ont été enregistrés afin de tenir compte de la variabilité des mesures en milieu industriel.

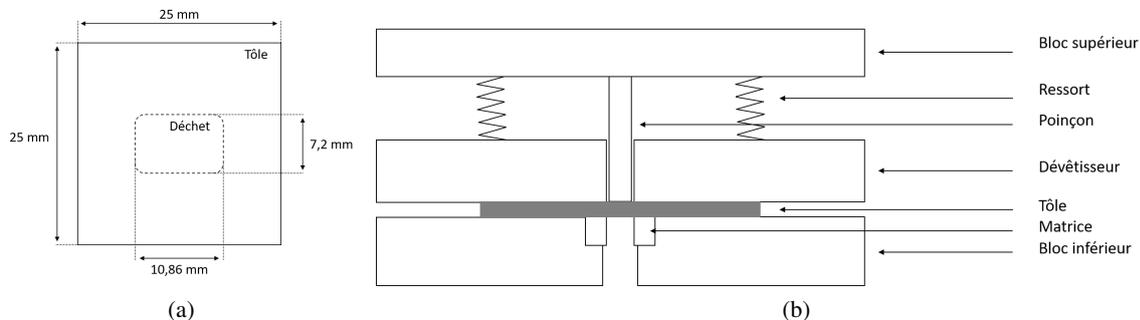


FIGURE 1 – (a) Forme découpée sur la tôle ; (b) Schéma du dispositif de découpe

Les résultats en terme de courbes force-déplacement se situent entre deux bornes extrêmes et la figure 2 montre uniquement ces 2 bornes. La figure 2 présente une borne inférieure de l'effort expérimental, ainsi qu'une borne supérieure. L'effort maximal lors de la découpe est compris entre 5559 N et 5841 N, ce qui donne une faible dispersion, avec un écart relatif de 5%. Les courbes d'effort mesurées présentent les différentes phases caractéristiques du comportement du matériau en découpage (comportement élastique, élasto-plastique, cisaillement et endommagement du matériau, amorçage et propagation des fissures jusqu'à rupture de la tôle) [13, 14]. L'apparition des premières fissures correspond à environ 56% de l'épaisseur de la tôle, estimée à partir de la chute brutale de l'effort de découpe.

La figure 3 montre un bord droit qui est observé au microscope électronique à balayage. A partir de cette image, les différentes hauteurs caractéristiques du bord découpé sont mesurées (hauteur bombée, cisailée, arrachée), les mesures sont présentées dans le tableau 2. Sur la partie supérieure du bord découpé, la zone bombée apparaît en clair, elle résulte de la flexion de la tôle lors de la pénétration du poinçon. Elle correspond à la phase élastique et élasto-plastique. La zone cisailée a un aspect lisse et rectiligne, elle résulte du cisaillement et de l'endommagement de la tôle. La zone arrachée est caractérisée par un aspect granulaire, elle est issue de l'endommagement du matériau ainsi que de l'amorçage de fissures et de leurs propagations jusqu'à rupture de la tôle [14]. Gréban et al. [9] ont mesuré une proportion de 82,5% de zone cisailée pour 17,5% de zone arrachée lors du découpage d'un cuivre Cua1 de 0,254 mm d'épaisseur pour des vitesses similaires (150 mm/s). La quantité de zone cisailée produite est nettement supérieure à celle de la zone arrachée. Pour les essais présentés ici, il y a pratiquement autant de zone cisailée produite que de zone arrachée. Les différences pourraient provenir d'une différence dans les propriétés mécaniques ou dans la microstructure entre les deux matériaux ainsi que la différence du jeu poinçon-matrice et l'état d'usure des outils de découpe.

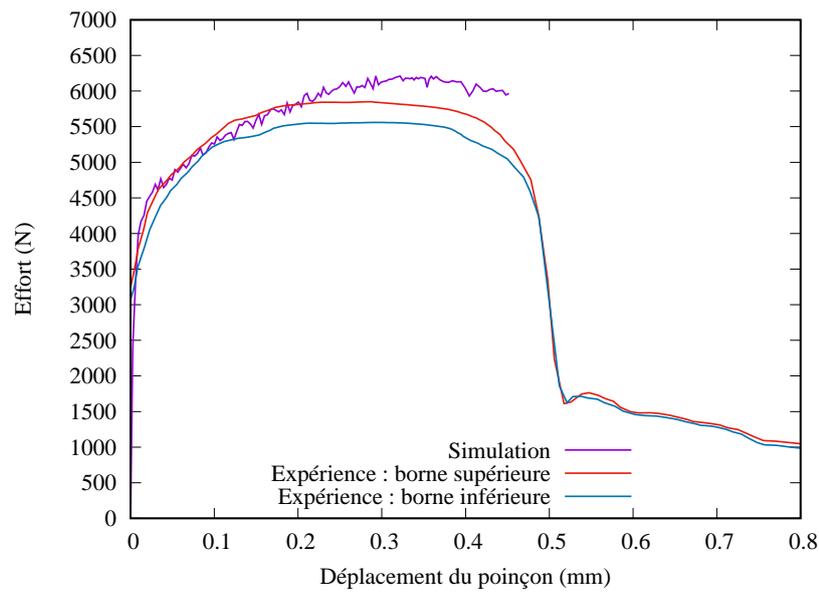


FIGURE 2 – Évolution de la force en fonction du déplacement du poinçon de découpe : résultats expérimentaux et prédiction numérique

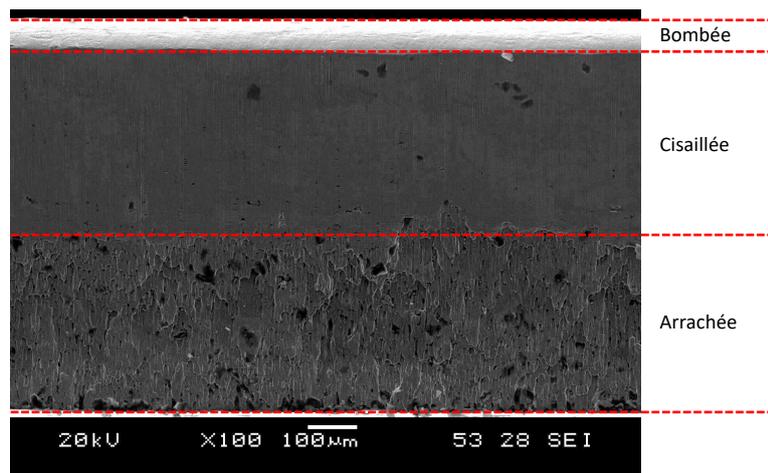


FIGURE 3 – Image d'un bord court du rectangle découpé obtenue par microscopie électronique à balayage

TABLEAU 2 – Mesures des hauteurs caractéristiques d'un bord court du rectangle découpé en μm et en pourcentage par rapport à l'épaisseur initiale de la tôle

Bombée	68 μm (8,5%)
Cisailée	382 μm (47,8%)
Arrachée	373 μm (46,6%)

3 Simulation numérique de la découpe

Dans une première approche, un modèle numérique d'un découpage 2D d'un bord droit, en déformations planes, est développé avec Abaqus/Explicit. En effet, la dimension du bord perpendiculaire à la direction de découpe est considérée suffisamment grande pour se placer en hypothèse des déformations planes. Un écrouissage isotrope ainsi qu'un critère de plasticité isotrope (von Mises) sont utilisés pour modéliser

le comportement du cuivre. Le contact est modélisé par une condition avec lubrification. Un maillage adaptatif (ALE) est utilisé pour le remaillage. La simulation n'allant pas jusqu'à la rupture, le retour élastique n'est pas simulé. L'objectif est de prédire l'effort maximal de découpe.

3.1 Modèle numérique

Le problème de découpage 2D déformations planes est illustré sur le schéma de la figure 4 et les dimensions sont indiquées dans le tableau 3. Les outils (poinçon, matrice, serre-flan) sont décrits par des surfaces analytiques rigides. La tôle est maillée avec des éléments 2D quadrangles à déformations planes CPE4R. Le maillage utilisé est représenté sur la figure 5, il est constitué de 11536 éléments et de 11748 noeuds. Un maillage raffiné est utilisé dans la zone correspondant à la zone de cisaillement (taille d'élément de 10 μm). Cette zone est comprise entre le rayon du poinçon et le rayon de la matrice. Un maillage plus grossier est utilisé en dehors de la zone soumise à de grandes déformations. Un maillage adaptatif (ALE) est utilisé pour contrôler la distorsion des éléments. La dimension perpendiculaire à la direction de la découpe est fixée à 1 mm lors du calcul 2D déformations planes. L'effort récupéré en simulation est un effort par unité de longueur qui est par la suite multiplié par le périmètre de la forme découpée pour obtenir une approximation de l'effort de découpe.

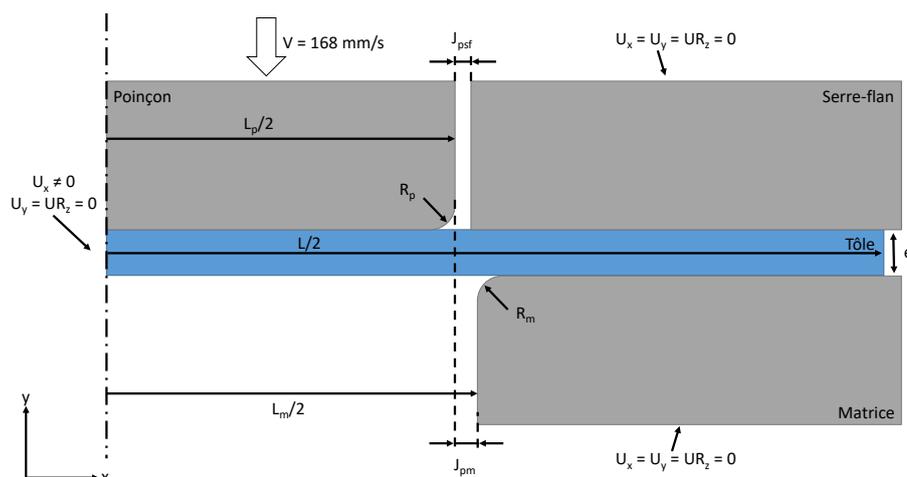


FIGURE 4 – Illustration du problème de découpage 2D déformations planes et conditions aux limites

TABLEAU 3 – Dimensions des outils et de la tôle

Épaisseur de la tôle e	0,80 mm
Longueur du poinçon L_p	10,86 mm
Longueur de la matrice L_m	10,95 mm
Rayon de courbure du poinçon R_p	10 μm
Rayon de courbure de la matrice R_m	10 μm
Jeu poinçon / matrice J_{pm}	45 μm
Jeu poinçon / serre-flan J_{psf}	8 μm
Longueur de la tôle L	25 mm

Le contact entre les outils rigides et la tôle déformable est modélisé par une loi de Coulomb. Husson [7] a montré que l'augmentation du coefficient de frottement (entre 0,02 et 0,15) conduit à une augmentation

de l'effort de découpe et à une diminution du déplacement pour l'amorçage de la fissure. Dans cette étude, pour modéliser des conditions de contact avec lubrification, le coefficient de frottement μ est fixé à 0,01. Les nœuds de la tôle sur la ligne de symétrie sont bloqués en déplacement dans la direction de la longueur de la tôle, ainsi que la rotation dans le plan de la tôle. Tous les degrés de liberté de la matrice et du serre-flan sont bloqués, l'effort serre-flan est négligé. Le poinçon est piloté en vitesse, $V = 168$ mm/s.

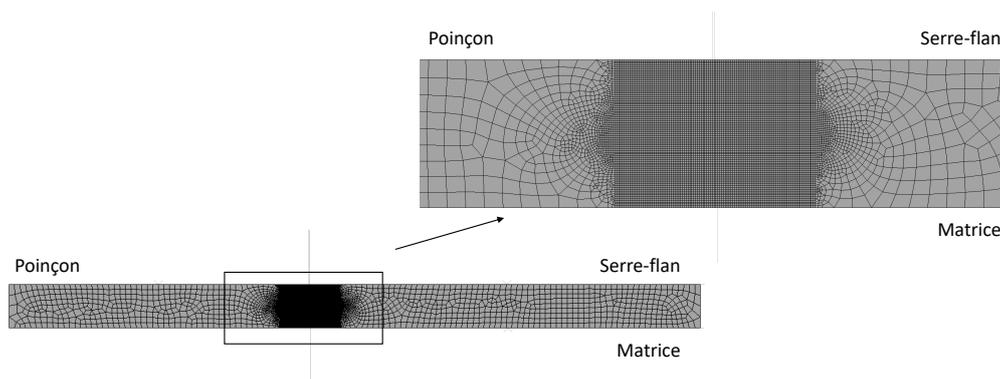


FIGURE 5 – Maillage utilisé lors de la simulation du découpage 2D déformations planes

3.2 Résultats numériques

La simulation est arrêtée pour un déplacement du poinçon correspondant à l'amorçage de la fissure (56% par rapport à l'épaisseur de la tôle). Par la simulation numérique, Husson [7] trouve une pénétration à rupture de 65% pour un alliage CuSn5 avec un jeu poinçon-matrice de $45 \mu\text{m}$, cette valeur à rupture semble cohérente avec celle obtenue expérimentalement. La figure 2 présente la courbe d'effort simulée superposée aux courbes expérimentales. L'allure de la courbe expérimentale est bien représentée jusqu'à un déplacement de 0,22 mm (27,5% par rapport à l'épaisseur de la tôle). Au-delà, la simulation surestime l'effort. L'effort maximal F_{max} prédit par la simulation se produit à un déplacement plus grand que l'expérience. Expérimentalement, l'effort maximal est compris entre 5559 N et 5841 N, ce qui correspond à un déplacement d'environ 0,29 mm (36% par rapport à l'épaisseur de la tôle). Ce dernier permet d'avoir une estimation de l'effort maximal simulé de 6032 N qui reste au-dessus des valeurs expérimentales. Hambli et Potiron [15] montrent la nécessité de prendre en compte l'endommagement afin d'avoir une prédiction réaliste de l'effort. De même, lors du découpage, un échauffement local se produit dans la zone déformée, ce qui conduirait à un adoucissement qui n'est pas pris en compte dans la simulation. L'effort croissant peut aussi provenir de la loi de comportement utilisée qui résulte de l'extrapolation de la courbe d'écrouissage issue d'un essai de traction. L'identification du comportement à partir d'un essai de cisaillement pourrait être pertinente, cet essai permettrait de se rapprocher de l'état de contrainte rencontré en découpage et d'atteindre des niveaux de déformation plus importants [12]. La simulation ne permet pas de prédire l'amorçage de la fissure, seules les hauteurs de la zone bombée et cisailée peuvent être mesurées, elles sont respectivement de $152 \mu\text{m}$ (19%) et $297 \mu\text{m}$ (37,1%). La simulation surestime la valeur du bombée et sous-estime celle de la zone cisailée. La zone bombée résulte

du comportement élastique et plastique de la tôle, elle est généralement surestimée en simulation du fait de la non prise en compte du retour élastique une fois le poinçon retiré de la tôle. Les figures 6a et 6b reprennent respectivement la distribution de la contrainte équivalente de von Mises et la déformation plastique équivalente à un déplacement de 0,22 mm (27,5% par rapport à l'épaisseur de la tôle). Les contraintes et déformations se concentrent selon une bande de cisaillement qui se situe dans le jeu entre le poinçon et la matrice.

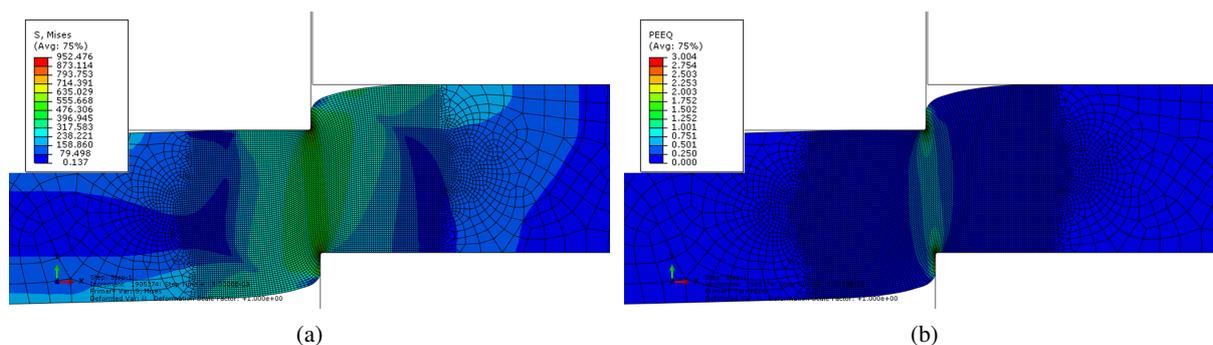


FIGURE 6 – (a) Distribution de la contrainte équivalente de von Mises (pour un déplacement égal à 27,5% de l'épaisseur initiale); (b) Distribution de la déformation plastique équivalente (pour un déplacement égal à 27,5% de l'épaisseur initiale)

4 Conclusion

Lors de cette étude, un dispositif expérimental permettant la caractérisation du comportement du cuivre lors de la découpe en conditions industrielles a été développé. Grâce à ce dispositif, l'évolution de la force de découpe en fonction du déplacement du poinçon est enregistrée, elle permet d'identifier l'effort maximal de découpe. Un modèle numérique 2D déformations planes de la découpe développé avec Abaqus/Explicit est présenté, il surestime légèrement l'effort de découpe.

5 Remerciements

Les auteurs remercient BPIFrance pour leur soutien financier dans le cadre du projet EXPRESSo (n°2017-PSPC-13 du 11/12/2017). Leurs remerciements s'adressent également à l'entreprise AXON MECHATRONICS.

Références

- [1] F. GRÉBAN, *Découvabilité du cuivre et des alliages cuivreux*. Thèse doctorat, Université de Franche-Comté, 2006.
- [2] A. MAILLARD et M. CABARET, *Outils de presse*. Ed. Techniques Ingénieur, 2012.
- [3] S. MEUNIER, *Analyse expérimentale du découpage progressif de précision à grande vitesse d'un alliage cuivreux en faible épaisseur*. Thèse doctorat, Université de Franche-Comté, 2004.
- [4] V. LEMIALE, *Contribution à la modélisation et à la simulation numérique du découpage des métaux*. Thèse doctorat, Université de Franche-Comté, 2004.

- [5] S. SUBRAMONIAN, T. ALTAN, C. CAMPBELL et B. CIOCIRLAN, « Determination of forces in high speed blanking using FEM and experiments », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 12, p. 2184–2190, 2013.
- [6] A. TOUACHE, *Contribution à la caractérisation et à la modélisation de l'influence de la vitesse et de la température sur le comportement en découpage de tôles minces*. Thèse doctorat, Université de Franche-Comté, 2006.
- [7] C. HUSSON, *Simulation numérique de la mise en forme des tôles métalliques appliquées à la connectique : Etude de la découpe*. Thèse doctorat, Université Louis Pasteur (Strasbourg), 2004.
- [8] P. DEMMEL, H. HOFFMANN, R. GOLLE, C. INTRA et W. VOLK, « Interaction of heat generation and material behaviour in sheet metal blanking », *CIRP Annals*, vol. 64, no. 1, p. 249–252, 2015.
- [9] F. GRÉBAN, G. MONTEIL et X. ROIZARD, « Influence of the structure of blanked materials upon the blanking quality of copper alloys », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 186, no. 1-3, p. 27–32, 2007.
- [10] C. POIZAT, L. CAMPAGNE, L. DARIDON, S. AHZI, C. HUSSON et L. MARIE, « Modeling and Simulation of Thin Sheet Blanking Using Damage and Rupture Criteria », *International Journal of Forming Processes*, vol. 8, no. 1, p. 29–47, 2005.
- [11] C. HUSSON, J. CORREIA, L. DARIDON et S. AHZI, « Finite elements simulations of thin copper sheets blanking : Study of blanking parameters on sheared edge quality », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 199, no. 1-3, p. 74–83, 2008.
- [12] F. ADZIMA, *Modélisation et simulation de procédés de mise en forme de tôles métalliques ultrafines*. Thèse doctorat, ENSAM Metz, 2016.
- [13] A. MAILLARD, *Étude expérimentale et théorique du découpage*. Thèse doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 1991.
- [14] R. HAMBLI, *Étude expérimentale, numérique et théorique du découpage des tôles en vue de l'optimisation du procédé*. Thèse doctorat, ENSAM Angers, 1996.
- [15] R. HAMBLI et A. POTIRON, « Finite element modeling of sheet-metal blanking operations with experimental verification », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 102, no. 1-3, p. 257–265, 2000.