

Analyse de sensibilité d'un modèle d'usure de poinçon lors du découpage d'alliages cuivreux

E. FALCONNET, J. CHAMBERT, H. MAKICH, G. MONTEIL, Ph. PICART

Institut FEMTO-ST, UMR 6174, Université de Franche-Comté / ENSMM, Département de Mécanique Appliquée, 24 rue de l'Épitaphe, 25000 BESANÇON

Résumé :

Les travaux présentés portent sur l'usure des poinçons lors du découpage d'alliages cuivreux. Une étude expérimentale a été conduite afin de caractériser le coefficient d'usure de trois nuances ainsi que leur comportement en traction. En parallèle, un modèle de prédiction d'usure basé sur la loi d'Archard a été développé sous Matlab. A partir de post-traitements issus de simulations par éléments finis du découpage sous Abaqus, l'usure du poinçon est alors évaluée par le modèle développé. La sensibilité de cet outil a été testée en faisant varier les principaux paramètres du procédé.

Abstract :

The present study deals with the wear of punches during the blanking of thin sheets in copper alloy. An experimental study has been conducted in order to characterize the wear coefficient of three materials and their mechanical behaviour during a tensile test. Furthermore, a wear model based on the Archard law has been developed on Matlab. From data post-processing of the finite element simulations of the blanking process under Abaqus, wear of the punch is thus determined by the present model. The sensitivity of this tool has been tested by varying the main parameters of the process.

Mots clefs : découpage, usure abrasive, éléments finis, loi d'Archard

1 Introduction

Le découpage des tôles est l'un des procédés de fabrication les plus utilisés dans l'industrie mécanique. Comme pour tout procédé de mise en forme, l'usure des outils joue un rôle prépondérant tant du point de vue de la qualité des pièces produites que des répercussions économiques associées (maintenance, durée de vie, coûts de production, etc.). La maîtrise de ce paramètre constitue donc un enjeu majeur pour la productivité et la compétitivité des entreprises.

Dans ce contexte, une étude expérimentale a été conduite par Makich [1] sur l'usure abrasive des poinçons lors du découpage d'alliages cuivreux. Dans une première partie, le présent papier propose de décrire un dispositif tribologique original, installé en entrée de presse à découper, qui permet de mesurer le coefficient d'usure. Les valeurs du coefficient d'usure sont présentées pour trois nuances d'alliages cuivreux, dont les propriétés mécaniques ont été caractérisées par des essais de traction.

En parallèle à ces travaux, une modélisation numérique de l'usure des poinçons de découpage a été établie à partir de la loi d'Archard [2]. La deuxième partie de cet article traite tout d'abord de la simulation numérique du découpage à l'aide du code de calcul par éléments finis Abaqus/CAE version 6.9. Les données issues de la simulation ont ensuite été traitées par un algorithme de calcul de l'usure, programmé sous Matlab. Enfin, une analyse de sensibilité du modèle numérique de l'usure est proposée pour trois principaux paramètres : le matériau, le jeu poinçon-matrice et le rayon d'arête du poinçon.

2 Analyse expérimentale

2.1 Description du dispositif expérimental de tribométrie

Afin de reproduire au mieux les conditions de frottement entre le poinçon et la tôle lors d'une opération de découpage, un tribomètre a été conçu et mis en place en amont d'une presse à découper [1]. Ce dispositif

consiste à user une bille, constituée d'un matériau identique à celui du poinçon, reposant sur la tôle qui va être découpée (figure 1). Une charge verticale est appliquée et le volume de la bille diminue à mesure que la bande défile. Contrairement aux tribomètres conventionnels, la bille frotte toujours sur une tôle neuve, la piste d'usure étant constamment renouvelée. L'intégration directe sur ligne de production permet également d'adapter les conditions opératoires aux essais menés.

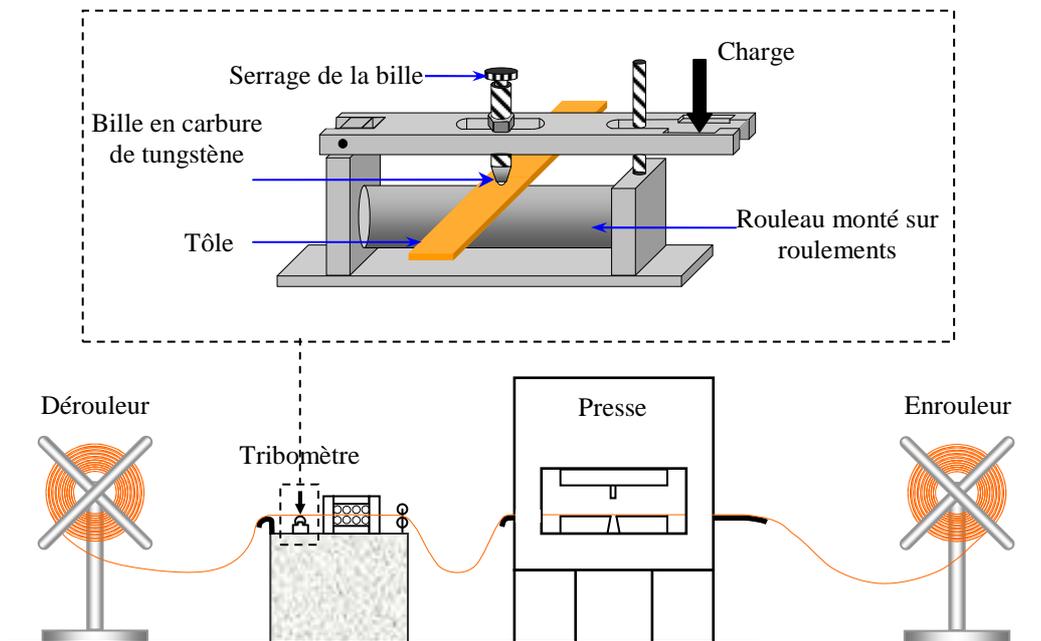


FIG. 1 – Schéma de principe du tribomètre et emplacement du tribomètre sur ligne de découpage.

2.2 Evaluation du coefficient d'usure

Le taux d'usure des matériaux étudiés est déterminé à partir de la mesure du volume de chaque bille usée V [1]. Le coefficient d'usure K est obtenu à partir de la relation d'Archard [2], pour une charge F_N et une distance s de frottement données :

$$V = K \cdot F_N \cdot s \quad (1)$$

Les valeurs obtenues du coefficient K pour différents alliages cuivreux sont présentées dans le tableau 1.

Matériau		CuFe0.1P0.03	CuNi18Zn20	CuSn6
Coefficient d'usure	K (10^{-17} m ² /N)	2,102	0,930	2,850
Module de Young	E (GPa)	121	102	91
Limite élastique	$R_{p0,2}$ (MPa)	332	470	443
Coefficient de Poisson	ν	0,34	0,34	0,34

TAB. 1 – Propriétés mécaniques et tribologiques des matériaux étudiés.

2.3 Essais de traction uni-axiale

Des essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes prélevées dans chaque bobine de tôle pour chaque matériau [1]. Les caractéristiques mécaniques obtenues sont reportées dans le tableau 1. Les courbes rationnelles de traction, présentées sur la figure 2, montrent que les alliages cuivreux considérés ont un comportement élastoplastique à écrouissage linéaire.

3 Modélisation et simulation

3.1 Simulation du découpage

La configuration étudiée est celle du découpage fin à l'aide d'un poinçon cylindrique. La tôle à découper est positionnée au-dessus d'une matrice dans laquelle le poinçon vient se loger. Un dévêtisseur vient s'appuyer

sur la tôle pour empêcher tout phénomène de retour élastique de la tôle et accroître ainsi la qualité du bord découpé (figure 3a).

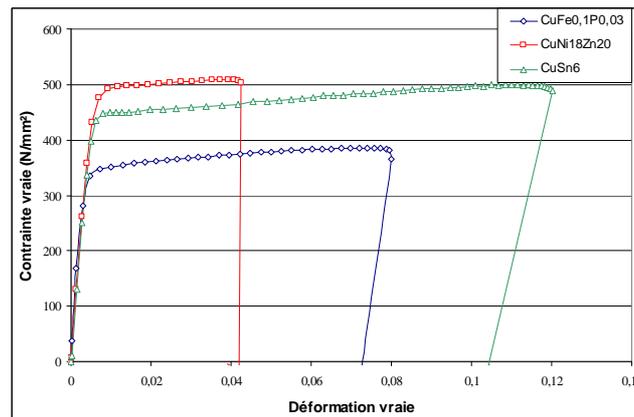


FIG. 2 – Courbes rationnelles de traction pour les trois matériaux testés.

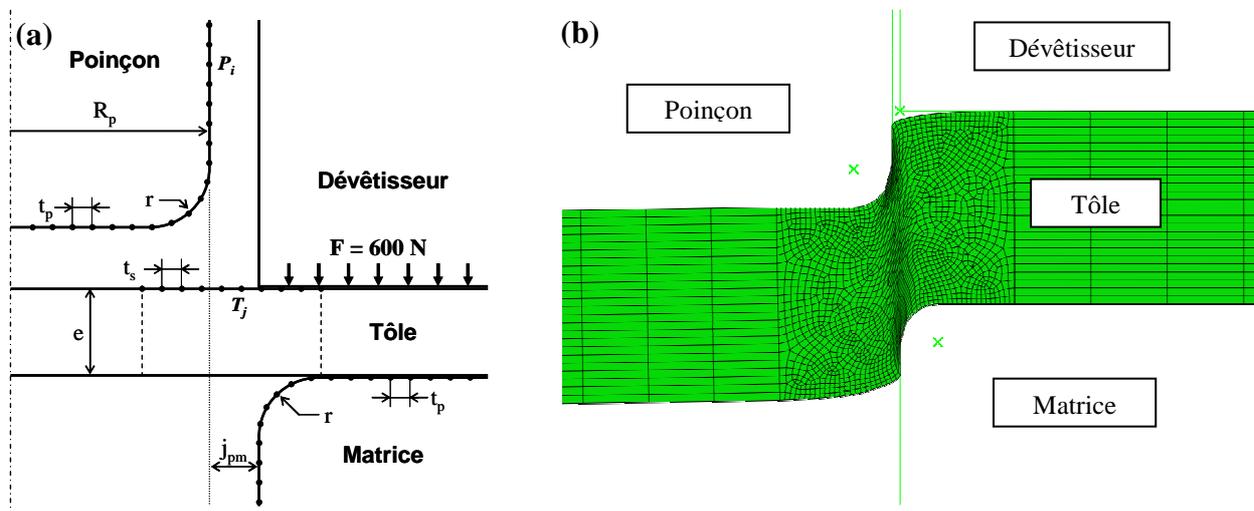


FIG. 3 – (a) Schéma du découpage axisymétrique ; (b) Maillage déformée pour une pénétration du poinçon de 50 % de l'épaisseur de la tôle.

Les simulations numériques du découpage axisymétrique ont été effectuées en grandes déformations à l'aide du solveur Abaqus/Standard selon un schéma de résolution implicite. Les principales caractéristiques géométriques du modèle de référence sont résumées dans le tableau 2. Dans la modélisation proposée, le rayon d'arête du poinçon correspond à un quart de cercle de rayon r (figure 3a).

Paramètre	Rayon poinçon R_p	Rayon arête poinçon r	Epaisseur tôle e	Jeu poinçon-matrice j_{pm}
Valeur	1,85 mm	50 μm	254 μm	10 μm

TAB. 2 – Caractéristiques géométriques du modèle de référence de découpage axisymétrique.

Du fait de l'axisymétrie, seule une moitié du problème est discrétisée (figure 3a). Le poinçon, la matrice et le dévêtisseur sont modélisés par des éléments rigides unidimensionnels. La tôle est maillée par des éléments quadrangulaires linéaires à quatre nœuds. Lors d'une opération de découpage, la déformation plastique se localise dans la zone située entre les arêtes du poinçon et de la matrice. Afin d'obtenir un maillage fin dans cette zone de cisaillement, la tôle est discrétisée en trois secteurs (figure 3b). De plus, la finesse du maillage à la surface de cette zone est requise pour calculer correctement la pression de contact et la distance de glissement nécessaires à l'établissement de la profondeur d'usure. Dans cette étude, le remaillage n'a pas été utilisé car les profondeurs de pénétration du poinçon étaient suffisantes pour obtenir des résultats satisfaisants.

Sachant que les déformations présentes dans la zone de cisaillement lors d'une opération de découpage dépassent largement les valeurs maximales des essais de traction, les courbes rationnelles de traction

(figure 2) ont été extrapolées linéairement en considérant l'écroûissage du matériau afin d'être implantées dans Abaqus.

La modélisation du contact entre la tôle et les outils est prise en compte par un algorithme de pénalisation faisant appel à une approche maître-esclave. Aux interfaces tôle/matrice et tôle/dévêtisseur, une loi de Coulomb est considérée avec un coefficient de frottement égal à 0,1. Aucun frottement n'est considéré entre le poinçon et la tôle.

Selon l'équation (1) d'Archard, il est nécessaire de connaître la pression de contact et la distance de glissement pour calculer la profondeur d'usure. Dans Abaqus/CAE, la pression de contact est définie comme la contrainte normale à deux facettes en un point et dépend de l'interpénétration des surfaces. Quant à la distance de glissement, elle est obtenue par le mouvement tangentiel relatif, défini comme étant le produit scalaire de la direction de glissement par le vecteur déplacement nodal relatif à chaque incrément. La distance de glissement calculée est donc dépendante de la direction de glissement et est cumulée à chaque incrément.

3.2 Loi d'usure d'Archard

En utilisant l'équation (1) d'Archard, le volume d'usure V du poinçon peut être déterminé à partir de l'effort normal de contact F_N appliqué au poinçon, de la distance de glissement s et du coefficient d'usure K qui correspond à la probabilité qu'une aspérité de surface puisse créer une particule d'usure.

En considérant un volume élémentaire représentatif [3], l'équation (1) devient pour un incrément ds donné :

$$dV = K \cdot dF_N \cdot ds \quad (2)$$

Sachant que $dV = dW \cdot d\Omega$ et $dF_N = p \cdot d\Omega$, où dW désigne un incrément de profondeur d'usure, $d\Omega$ une surface de contact élémentaire, p la pression de contact, l'équation (2) permet d'obtenir la relation suivante :

$$dW = K \cdot p \cdot ds \quad (3)$$

Entre deux incréments n et $n+1$, la relation (3) est alors intégrée selon le schéma d'Euler suivant :

$$W_{P_i}^{n+1} = W_{P_i}^n + K \cdot p_{P_i}^{n+1} \cdot (s_n^{n+1})_{P_i} \quad \text{avec} \quad (s_n^{n+1})_{P_i} = s_{P_i}^{n+1} - s_{P_i}^n, \quad (4)$$

où $W_{P_i}^n$ est la profondeur d'usure à l'incrément n calculé au point du poinçon P_i de coordonnées \bar{x}_i , $p_{P_i}^{n+1}$ est la pression de contact à l'incrément $n+1$ calculée en P_i . $(s_n^{n+1})_{P_i}$ est la distance de glissement entre les incréments n et $n+1$, sachant que $s_{P_i}^n$ est la distance de glissement cumulée à l'incrément n obtenue par le calcul par éléments finis.

Le poinçon étant modélisé par des éléments rigides, aucun calcul de contrainte, pression et glissement n'est effectué sur cet outil. Les données de pression de contact et de distance de glissement calculées sur la tôle sont donc utilisées pour déterminer l'usure sur le poinçon. A partir du concept de modélisation non locale développé par Pijaudier-Cabot et Bazant [4], l'expression $p_{P_i}^{n+1} \cdot (s_n^{n+1})_{P_i}$ définie au point P_i du poinçon de coordonnées \bar{x}_i est obtenue en utilisant la moyenne pondérée des valeurs $p_{T_j}^{n+1} \cdot (s_n^{n+1})_{T_j}$ définies aux points T_j de la tôle (de coordonnées \bar{y}_j), qui se situent au voisinage de P_i . L'équation (4) s'exprime alors sous la forme d'une intégrale discrète, qui correspond au calcul de la profondeur d'usure au point P_i :

$$W_{P_i}^{n+1} = W_{P_i}^n + \frac{N_p \cdot K}{\Psi(\bar{x}_i, \bar{y}_j)} \left[\sum_{j=1}^N p_{T_j}^{n+1} \cdot (s_n^{n+1})_{T_j} \cdot \Phi(\bar{x}_i, \bar{y}_j) \right] \quad (5)$$

avec $\Psi(\bar{x}_i, \bar{y}_j) = \sum_{j=1}^N \Phi(\bar{x}_i, \bar{y}_j)$ et $\Phi(\bar{x}_i, \bar{y}_j) = \exp\left[-|\bar{x}_i - \bar{y}_j|^2 / L_c^2\right]$

où L_c est un paramètre de longueur qui détermine le nombre de nœuds de la tôle pris en considération dans la pondération (ici on prend $L_c = 2 t_p$), N est le nombre de nœuds de la tôle pris en compte dans la fonction de pondération et N_p est le nombre de coups de presse correspondant au nombre de pièces fabriquées [3]. Il est à remarquer que les paramètres L_c et N sont dépendants l'un de l'autre.

4 Analyse de sensibilité numérique

Considérons un modèle de « référence » constitué du matériau CuFe0.1P0.03 avec des caractéristiques géométriques présentées dans le tableau 2. L'analyse de sensibilité numérique du modèle d'usure du poinçon discrétisé par l'équation (5) s'effectue alors en changeant un paramètre du modèle de référence.

4.1 Influence du matériau

Après traitement des données de la simulation par l'algorithme de calcul d'usure en tenant compte du coefficient d'usure de chaque matériau (tableau 1), la figure 4a illustre les résultats obtenus pour un nombre fictif de 10^4 coups de presse et pour une pénétration du poinçon de 30 % de l'épaisseur de la tôle. Quel que soit le matériau, on observe toujours une même tendance pour la courbe de la profondeur d'usure en fonction de l'abscisse curviligne. Le matériau le plus abrasif CuSn6 présente bien la plus forte usure, suivi du CuFe0.1P0.03 et enfin du CuNi18Zn20 dans la zone plane proche de l'arête du poinçon (abscisse comprise entre 1720 μm et 1800 μm) et dans la zone arrondie (abscisse comprise entre 1800 μm et 1880 μm).

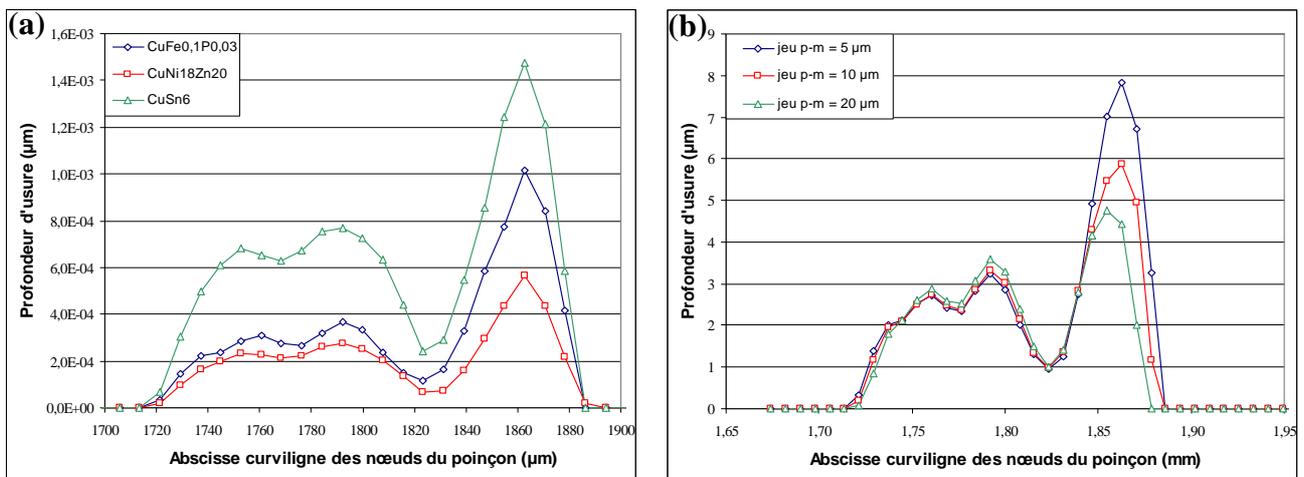


FIG. 4 – Répartition de l'usure pour trois matériaux différents (a) et pour trois valeurs du jeu poinçon-matrice différentes (b) avec une même pénétration du poinçon de 30 % de l'épaisseur de la tôle.

4.2 Influence du jeu poinçon - matrice

Le jeu entre le poinçon et la matrice est un paramètre prépondérant du découpage qui conditionne la qualité du bord découpé. Si celui-ci dépasse une valeur optimale, la partie bombée du bord découpé ainsi que la bavure formée augmentent de façon significative. Au contraire, si le jeu est trop faible, des fissures secondaires peuvent apparaître et l'effort de poinçonnage augmente.

En faisant varier le jeu entre 5 μm et 20 μm pour un nombre fictif de 10^8 coups de presse et pour une pénétration maximale du poinçon de 30 % de l'épaisseur de la tôle, on constate sur la figure 4b que le jeu poinçon-matrice n'influe pas de manière significative sur la profondeur d'usure à l'exception de la zone correspondante à la partie haute de l'arrondi du poinçon (abscisse supérieure à 1,84 mm).

4.3 Influence du rayon d'arête du poinçon

Hambli [5] a émis l'hypothèse que « l'état d'usure de l'outillage est caractérisé par le rayon de courbure de son bord tranchant ». Pour vérifier cette hypothèse, la valeur du rayon d'arête est fixé successivement à 25 μm , 50 μm et 65 μm . Quel que soit le rayon d'arête, la taille des éléments du poinçon t_p (figure 3a) est déterminée de façon à obtenir un nombre de 10 éléments dans la zone arrondie du poinçon en quart de cercle. Les simulations sont arrêtées dès que la distorsion des éléments de la tôle devient critique. Par conséquent, plus le rayon d'arête est faible, plus cette distorsion intervient prématurément. Un nombre fictif de 10^8 coups de presse a été pris en compte.

Après traitement des données par l'algorithme d'usure, nous avons obtenu les résultats présentés sur la figure 5a. Pour comparer les différents profils sur une même base, nous avons introduit une abscisse curviligne adimensionnelle basée sur les extrémités de la zone arrondie (figure 5b). Le milieu du quart de cercle correspond à l'abscisse « zéro » (point O) et les extrémités gauche et droite correspondent

respectivement aux valeurs « -1 » (point A) et « +1 ». Chaque position M du quart de cercle est donc obtenue en divisant l'arc OM par OA (qui correspond à $1/8^e$ du cercle de rayon r).

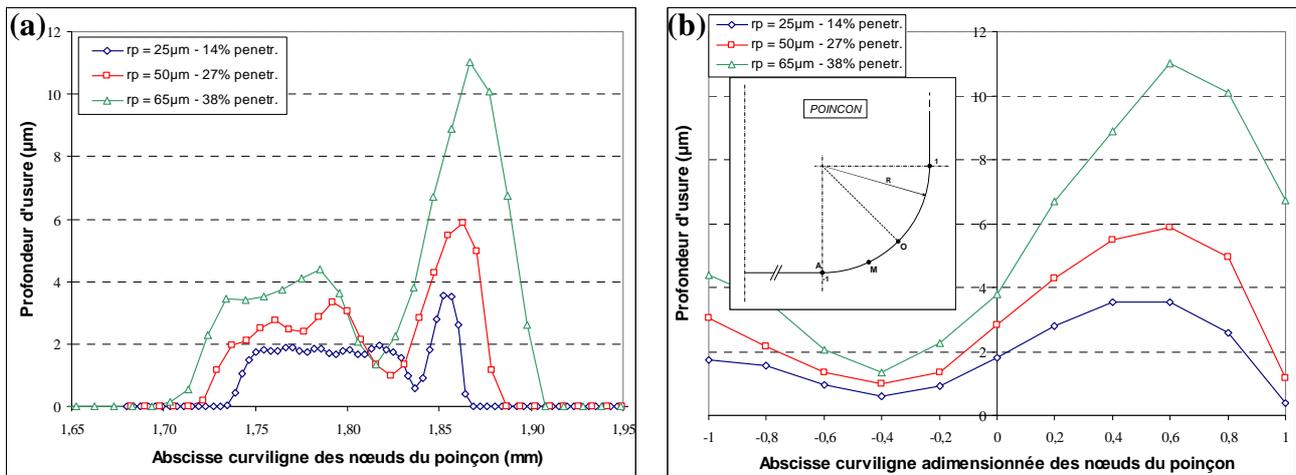


FIG. 5 – Répartition de l'usure pour trois rayons de congés à des pénétrations différentes en fonction de l'abscisse curviligne (a) et de l'abscisse curviligne adimensionnelle (b).

Cette analyse révèle que l'usure décroît de façon lente et homogène jusqu'au premier quart de l'arrondi environ. Il existe alors une zone où la profondeur d'usure devient minimale, résultant de la combinaison d'un glissement et d'une pression de contact localement plus faibles. En effet, la simulation par éléments finis révèle que lors de la descente du poinçon, certains nœuds du poinçon et de la surface de la tôle coïncident au cours du mouvement. Quel que soit le rayon d'arête, la figure 5b montre également que le minimum d'usure se situe toujours à la même abscisse adimensionnelle égale à -0,4. Cela peut s'expliquer par le fait que les problèmes sont homothétiques en termes de rayon de courbure. Enfin, on constate une usure plus importante sur la partie verticale du poinçon, provoquée par le glissement relatif mais également par l'effort généré horizontalement par la tôle sur le poinçon.

5 Conclusion

Au cours de ces travaux, nous avons développé une simulation numérique du découpage fin ainsi qu'un modèle numérique de prédiction de l'usure du poinçon basé sur la loi d'Archard. Les données expérimentales du coefficient d'usure et du comportement mécanique des alliages cuivreux de la tôle à découper sont nécessaires pour déterminer la répartition de l'usure le long du profil du poinçon. L'analyse de sensibilité menée a permis d'évaluer l'influence de certains paramètres sur l'usure du poinçon. Ainsi, les propriétés mécaniques du matériau semblent avoir une moindre influence sur l'usure que les propriétés tribologiques (abrasivité). En outre, une variation relativement faible du jeu entre le poinçon et la matrice a un effet négligeable sur l'usure du poinçon. Ce paramètre influe principalement sur le mécanisme de fissuration de la tôle. Enfin, l'étude sur le rayon d'arête du poinçon, sensé représenter différents états d'usure, nous a permis de déterminer la répartition de l'usure le long du profil. Nous avons pu également constater la présence d'une zone de faible usure dont la position reste identique quel que soit le rayon d'arête.

Références

- [1] Makich H., Etude théorique et expérimentale de l'usure des outils de découpe – Influence sur la qualité des pièces découpées, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Besançon, France, 2011.
- [2] Archard J.F., Hirst W., The wear of metals under unlubricated conditions, Proc. R. Soc. London, Ser. A, 236, 397-410, 1956.
- [3] Hambli R., Potiron A., Modélisation et simulation du découpage des tôles, Techniques de l'Ingénieur, BM 7 505, 2004.
- [4] Pijaudier-Cabot G., Bazant Z.P., Nonlocal damage theory, J. Eng. Mech., 113, 1512-1533, 1987.
- [5] Hambli R., Etude expérimentale, numérique et théorique du découpage des tôles en vue de l'optimisation du procédé, Thèse de doctorat, ENSAM d'Angers, France, 1996.